



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**PREVISÃO DE NÍVEIS FLUVIAIS DE INUNDAÇÃO PARA A CIDADE
DE LAJEADO, RIO GRANDE DO SUL, A PARTIR DE DIFERENTES
ABORDAGENS MATEMÁTICAS**

Fabiane Gerhard

Lajeado, dezembro de 2017

Fabiane Gerhard

**PREVISÃO DE NÍVEIS FLUVIAIS DE INUNDAÇÃO PARA A CIDADE
DE LAJEADO, RIO GRANDE DO SUL, A PARTIR DE DIFERENTES
ABORDAGENS MATEMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso II submetido
ao Curso de Engenharia Ambiental, da
Universidade do Vale do Taquari - Univates,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt

Lajeado, dezembro de 2017

Fabiane Gerhard

**PREVISÃO DE NÍVEIS FLUVIAIS DE INUNDAÇÃO PARA A CIDADE
DE LAJEADO, RIO GRANDE DO SUL, A PARTIR DE DIFERENTES
ABORDAGENS MATEMÁTICAS**

A banca examinadora abaixo aprova o Trabalho de Conclusão de Curso Etapa II, apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Ambiental:

Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt – orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Ms. Marcelo Luis Kronbauer
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lajeado, dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente meus pais Gervásio e Rosilene; aos meus irmãos Anderson e Gustavo; aos meus avós Arcênio e Elsira, e; aos meus sogros Margarete e Adilar, pelos ensinamentos, orações, paciência e incentivo dedicados durante esses 8 anos de caminhada.

Ao meu namorado, Tiago, pelo amor, companheirismo, paciência e compreensão, que foram alicerce para o alcance dessa conquista.

Ao Professor Dr. Guilherme Garcia de Oliveira pelo imenso apoio, prestatividade, paciência e vastos ensinamentos que permitiram a realização desse trabalho. Muito obrigada!

Ao Professor Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt pela paciência, e auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Professor Dr. Claus Haetinger pelo auxílio dedicado na seleção de um *software* de modelagem por regressão múltipla.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) pela disponibilização de dados hidrometeorológicos históricos.

Às colegas e amigas Karin, Diana, Carolina, Betina, Sofia e Paula Sabrina, pela amizade, apoio e compreensão durante essa etapa de graduação.

E, por fim, agradeço à Deus por ter sempre me guiado e dado forças para seguir adiante, mesmo nos momentos mais difíceis.

RESUMO

As inundações são fenômenos naturais, mas, que passaram a se tornar um problema a partir do momento que os seres humanos começaram a habitar as margens dos rios. Esta é a realidade do município de Lajeado/RS, que é atingido, em média, por uma inundação a cada ano, a qual acarreta numa série de transtornos econômicos e sociais. Em virtude dessa elevada recorrência, o presente estudo teve o objetivo de desenvolver e avaliar duas abordagens matemáticas para previsão de níveis fluviais de inundação no município de Lajeado. A primeira abordagem (AB1) se refere a modelos matemáticos que levaram em consideração uma série pareada de picos de inundação atingidos em Lajeado e Encantado, além da chuva média acumulada e filtrada na bacia complementar entre estes municípios. A segunda abordagem (AB2) corresponde à aplicação de modelos matemáticos para a simulação de séries horárias contínuas de níveis fluviais num horizonte de 6h à frente ($t+6$), utilizando as cotas horárias das estações fluviométricas de Lajeado e Encantado, e variáveis diárias de precipitação, ambas com diferentes defasagens temporais. A modelagem dos níveis fluviais da AB1 foi realizada por Regressão Múltipla (RM), e, da AB2, por RM e Redes Neurais Artificiais (RNAs), sendo que as variáveis de entrada foram selecionadas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson. Na AB1 foram desenvolvidos dois modelos, um considerando a série de picos de Encantado e Lajeado, e a chuva filtrada desde 1941 até 2016 (MOD_1941), e, outro, com a série de 1980 a 2016 (MOD_1980), que corresponde somente às aferições de níveis realizadas por réguas limimétricas e sensores automáticos, sem registros históricos. Verificou-se que o MOD_1980 apresentou melhor desempenho para a previsão de níveis de inundação na cidade de Lajeado, em comparação ao MOD_1941, destacando-se que os coeficientes de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) obtidos perante as amostras de validação foram, respectivamente, de 0,951 e 0,899. Na AB2, desenvolveram-se dois modelos para o horizonte ($t+6$), um por RM (MOD_RM) e outro por RNAs (MOD_RNAs), sendo que o MOD_RNAs apresentou melhor desempenho na previsão de níveis, inclusive para eventos de cheia e inundação, provavelmente por ter considerado um conjunto maior de dados de entrada, sendo as cotas registradas em Lajeado e Encantado às 6 h, a chuva filtrada e a precipitação acumulada em 3 dias anteriores. Salienta-se que o NS obtido durante a validação do MOD_RNAs foi de 0,980, enquanto que o NS do MOD_RM foi de 0,967. Comparando o MOD_RNAs ao MOD_1980, as análises realizadas não permitiram definir o modelo mais preciso na previsão de níveis de inundação, podendo ambas as configurações serem aplicadas em casos reais, sendo a grande vantagem do MOD_RNAs o horizonte de previsão fixo de 6h. Resumidamente, este estudo forneceu resultados satisfatórios e apresenta novos modelos matemáticos para a previsão de níveis fluviais no município de Lajeado, demonstrando a importância de constantes atualizações dos modelos, bem como a tentativa de emprego de novas variáveis explicativas, visto que a utilização dos dados de precipitação resultou num aumento da qualidade de previsão.

Palavras-chave: Inundações; Modelagem Matemática; Séries Hidrológicas.

ABSTRACT

Floods are natural phenomena, but they have become a problem from the time humans began to inhabit the banks of the rivers. This is the reality of the municipality of Lajeado/RS, which is reached, on average, by a flood every year, which causes a series of economic and social disturbances. Due to this high recurrence, the present study had the objective of developing and evaluating two mathematical approaches to predict flood levels in the municipality of Lajeado. The first approach (AB1) refers to mathematic models that took into account a paired series of flood spikes reached in Lajeado and Encantado, in addition to the accumulated average rainfall and filtered in the complementary basin between these municipalities. The second approach (AB2) corresponds to the application of mathematical models for the simulation of continuous hourly series of fluvial levels in a horizon of 6 hours ahead ($t+6$), using the hourly quotas of Lajeado and Encantado fluviometrics stations, and daily variables of precipitation, both with different temporal lags. The modeling of fluvial levels of AB1 was performed by Multiple Regression (MR), and by AB2, by MR and Artificial Neural Networks (ANNs), and the input variables were selected by Pearson's linear correlation coefficient. In AB1, two models were developed, one considering the Encantado and Lajeado series of peaks, and the filtered rain from 1941 to 2016 (MOD_1941), and another with the series from 1980 to 2016 (MOD_1980), which corresponds only to the measurements of levels made by linimetric rulers and automatic sensors, without historical records. It was verified that the MOD_1980 presented better performance for the prediction of flood levels in the city of Lajeado, in comparison to MOD_1941, noting that the Nash-Sutcliffe (NS) efficiency coefficients obtained with the validation samples were, respectively, of 0.951 and 0.899. In AB2, two models were developed for the horizon ($t+6$), one by MR (MOD_MR) and the other by ANNs (MOD_ANNs), and MOD_ANNs presented better performance in predicting levels, including flood events, probably because it considered a larger set of input data, with quotas recorded in Lajeado and Encantado at 6:00 AM, filtered rainfall and precipitation accumulated in the previous 3 days. It should be noted that the NS obtained during the validation of the MOD_ANNs was 0.980, whereas the NS of the MOD_MR was 0.967. Comparing the MOD_ANNs to the MOD_1980, as performed analyzes did not allow to define the most accurate model in the prediction of flood levels, both of which can be applied in real cases, being a great advantage of the MOD_ANNs the fixed forecast horizon of 6 h. Briefly, this study provided satisfactory results and presents new mathematical models for predicting river levels in the municipality of Lajeado, demonstrating the importance of constant updates of the models, as well as the attempt to use new explanatory variables, since the use of precipitation data resulted in an increase in forecast quality.

Keywords: Floods; Mathematical Modeling; Hydrological Series.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Inverso do Quadrado da Distância.....	69
Equação 2 – Filtro de decaimento exponencial da precipitação.....	69
Equação 3 – Coeficiente de correlação linear de Pearson	71
Equação 4 – Modelo genérico da Regressão Múltipla	72
Equação 5 – Ferramenta <i>F-statistic</i>	72
Equação 6 – Princípio de funcionamento de um neurônio artificial	73
Equação 7 – RNA de uma camada interna	74
Equação 8 – Função de ativação sigmoide unipolar.....	75
Equação 9 – Derivada da função de ativação sigmoide unipolar	75
Equação 10 – RNA com escalonamento linear das entradas e saídas	75
Equação 11 – Regra Delta de treinamento	76
Equação 12 – Erro do método retropropagativo.....	76
Equação 13 – Coeficiente de determinação.....	78
Equação 14 – Erro absoluto médio.....	78
Equação 15 – Raiz do erro quadrático médio.....	78
Equação 16 – Erro proporcional médio.....	78
Equação 17 – Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe	79
Equação 18 – Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe Adaptado.....	79
Equação 19 – Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1941).....	93
Equação 20 – Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1980).....	97
Equação 21 – Modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RM).....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico e seus principais componentes	19
Figura 2 – Representação do leito menor, maior e excepcional de um corpo hídrico.....	24
Figura 3 – Representação do Vale do Taquari, destacando-se o município de Lajeado	28
Figura 4 – Representação do SACE do rio Caí	41
Figura 5 – Resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva de curta duração	47
Figura 6 – Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas	54
Figura 7 – Altimetria da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas	55
Figura 8 – Delimitação da área de estudo: bacia complementar entre os postos fluviométricos de montante (Encantado) e jusante (Estrela)	56
Figura 9 – Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	57
Figura 10 – Inundação de 1941 na rua Silva Jardim	61
Figura 11 – Inundação de 1956 na esquina da rua Silva Jardim com a João Abott	62
Figura 12 – Vista panorâmica da inundação de 03 de outubro de 2001.....	62
Figura 13 – Interrupção do tráfego na rua João Abott pela inundação de outubro de 2016.....	62
Figura 14 – Fluxograma metodológico do presente estudo.....	65
Figura 15 – Representação das camadas de uma RNA	73
Figura 16 – Erros e frequências de não excedência.....	80
Figura 17 – Análise de consistência da estação 2952006 em relação às estações próximas, considerando a precipitação acumulada no tempo (A), a diferença diária de precipitação (B) e a diferença acumulada de precipitação (C).....	82
Figura 18 – Análise de consistência da estação 2852028 em relação às estações próximas, considerando a precipitação acumulada no tempo (A), a diferença diária de precipitação (B) e a diferença acumulada de precipitação (C).....	83

Figura 19 – Grade retangular de interpolação da área de estudo.....	88
Figura 20 – Ajuste da precipitação média observada (A) e da precipitação média filtrada (B) aos níveis fluviométricos medidos em Lajeado	89
Figura 21 – Superfície ajustada para a previsão de nível fluvial em Lajeado, a partir da cota máxima observada em Encantado e da chuva filtrada na bacia complementar (MOD_1941)	93
Figura 22 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado (A) e os resíduos da modelagem dos níveis fluviais (B), durante a calibração do MOD_1941	94
Figura 23 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado (A) e os resíduos da modelagem dos níveis fluviais (B), durante a calibração do MOD_1980	98
Figura 24 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RM.....	102
Figura 25 – Ajuste (A) e resíduos (B) da modelagem dos níveis fluviais em Lajeado para o período de 13 a 17/09/1988	102
Figura 26 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RNAs	104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Série histórica de inundações em Lajeado/RS, conforme nível fluvial medido na Estação Fluviométrica do Porto de Estrela	31
Gráfico 2 – Comparativo dos dados fluviométricos registrados às 12h nos municípios de Lajeado (jusante) e Encantado (montante), durante o intervalo de 01/01/2006 a 15/05/2006	87
Gráfico 3 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_1941	96
Gráfico 4 – Ajuste das cotas observadas e modeladas para Lajeado durante a validação do MOD_1980	99
Gráfico 5 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RNAs, considerando somente eventos de cheia e inundação.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de entrada consideradas em cada abordagem.....	70
Tabela 2 – Resultados da análise de consistência das estações pluviométricas com dados brutos num período superior a 10 anos.....	84
Tabela 3 – Série de cotas máximas (m) registradas nos municípios de Lajeado e Encantado .	86
Tabela 4 – Correlação linear de Pearson (R) entre a cota máxima atingida em Lajeado e outras séries de dados hidrológicos durante o período de 1941 e 2005 (A), e durante o período de 1980 e 2009 (B).....	90
Tabela 5 – Correlação linear de Pearson (R) entre a cotas atingidas em Lajeado 6 h à frente (t+6), e outras séries de dados hidrológicos	92
Tabela 6 – Medidas de desempenho dos modelos baseados em eventos discretos.....	94
Tabela 7 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a calibração do MOD_1941	95
Tabela 8 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_1941	97
Tabela 9 – Cotas observadas e modeladas para Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a calibração do MOD_1980.....	98
Tabela 10 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_1980	100
Tabela 11 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RM)	101
Tabela 12 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RNAs)	103

Tabela 13 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RNAs) considerando somente eventos de cheia e inundação	105
Tabela 14 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_RNAs, considerando somente eventos de cheia e inundação	106
Tabela 15 – Síntese das medidas de desempenho das amostras de validação dos modelos matemáticos desenvolvidos no presente estudo.....	107
Tabela 16 – Aplicação dos modelos baseados em eventos discretos em escala horária para a inundação de outubro de 2016	108

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Ciclo hidrológico	18
3.2 Enchentes, inundações e enxurradas: definições e problemática	23
3.3 Inundações no Vale do Taquari	28
3.4 Hidrometria e aquisição de dados hidrológicos	32
3.5 Sistemas de monitoramento e alerta a inundações	38
3.6 Modelos para previsão de inundações	42
4 METODOLOGIA.....	53
4.1 Área de estudo.....	53
4.1.1 Geologia, geomorfologia e pedologia	57
4.1.2 Clima e precipitação.....	58
4.1.3 Processo de ocupação e as inundações do rio Taquari-Antas	60
4.2 Base de dados e softwares utilizados.....	63
4.3 Procedimentos metodológicos.....	64
4.3.1 Levantamento, organização e consistência dos dados hidrometeorológicos	66
4.3.1.1 Ajuste dos dados pluviométricos	68
4.3.2 Calibração dos diferentes modelos matemáticos	70
4.3.2.1 Análise de correlação linear.....	70

4.3.2.2 Ajuste dos modelos com regressão múltipla	71
4.3.2.3 Ajuste dos modelos com redes neurais artificiais	73
4.3.3 Análise de desempenho dos modelos matemáticos	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
5.1 Organização e consistência dos dados hidrometeorológicos	81
5.1.1 Dados pluviométricos	81
5.1.2 Dados fluviométricos	85
5.1.3 Ajuste dos dados pluviométricos	88
5.2 Calibração dos diferentes modelos matemáticos	90
5.2.1 Análise de correlação linear.....	90
5.2.1.1 Modelos baseados em eventos discretos – Abordagem 1	90
5.2.1.2 Modelos baseados em séries horárias contínuas - Abordagem 2	92
5.2.2 Ajuste dos modelos com regressão múltipla.....	93
5.2.2.1 Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1941) – Abordagem 1	93
5.2.2.2 Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1980) – Abordagem 1	97
5.2.2.3 Modelo baseado em séries horárias contínuas para o horizonte de previsão (t+6) (MOD_RM) – Abordagem 2.....	100
5.2.3 Ajuste do modelo com redes neurais artificias	103
5.2.3.1 Modelo baseado em séries horárias contínuas para o horizonte de previsão (t+6) (MOD_RNAs) – Abordagem 2	103
5.3 Análise de desempenho dos modelos matemáticos	106
5.3.1 Modelos baseados em eventos discretos - Abordagem 1	106
5.3.2 Modelos baseados em séries horárias contínuas - Abordagem 2	110
6 CONCLUSÕES.....	112
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICES	125

1 INTRODUÇÃO

As enchentes são fenômenos naturais e antigos, que ocorrem no planeta Terra antes mesmo do ser humano surgir (DORNELLES, 2007). Estas constituem parte do ciclo hidrológico e são caracterizadas pela elevação do nível de um corpo hídrico além da sua vazão normal, podendo ou não causar o seu transbordamento. Quando as águas se elevam até as margens do rio, sem que transbordem para as adjacentes, tem-se uma enchente. Já a partir do momento que ocorre o extravasamento, tem-se uma inundação (TUCCI; BERTONI, 2003; GOERL; KOBIYAMA, 2005; KOBIYAMA et al., 2006).

Quando o homem deixou de ser nômade, ele passou a se estabelecer preferencialmente próximo aos corpos hídricos, o que prevalece até hoje, visto a necessidade de água para seu consumo, para o desenvolvimento das práticas agrícolas, de pecuária e industriais, bem como para disposição dos seus dejetos. Ademais, os rios também têm a funcionalidade de via de transporte para fins comerciais e de interligação das comunidades ribeirinhas (DORNELLES, 2007; OLIVEIRA; SALDANHA; GUASSELLI, 2011).

Ao ocupar estas áreas, os habitantes passam a conviver com o regime natural dos corpos hídricos e enfrentam uma série de problemas nos períodos de cheia, sobretudo quando ocorrem inundações e enxurradas. Os principais impactos negativos destes eventos são representados pela interrupção de atividades, deterioração de equipamentos públicos, perda de bens materiais, evacuação das moradias, contração de doenças de veiculação hídrica, e, em casos extremos, a perda de vidas humanas, os quais refletem em prejuízos de ordem social, econômica e ambiental (OLIVEIRA; GUASSELLI; SALDANHA, 2012; TUCCI, 2013; KUREK, 2016). Apesar dos riscos associados à ocupação de zonas ribeirinhas, Tucci (2013) destaca que estas áreas geralmente são habitadas por pessoas com baixo poder aquisitivo e marginalizadas pela

sociedade, muitas vezes encorajados pela baixa frequência de inundações. De acordo com o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (CENAD, 2014), somente no ano de 2013, mais de 2,5 milhões de brasileiros foram afetados por eventos hidrológicos extremos, sendo neste valor contabilizados os desalojados, desabrigados, enfermos, feridos, desaparecidos e mortos. Já em nível de Estado, entre os anos de 1991 e 2012, cerca de 3 milhões de gaúchos foram afetados por estes eventos extremos, sendo importante salientar, que o município de Estrela, vizinho ao município de Lajeado, é o mais recorrentemente atingido pelas inundações. Além disso, no mesmo período, mais de 1 milhão de construções e sistemas de infraestrutura foram afetadas (CEPED/UFSC, 2013).

Para contornar estes problemas e minimizar os prejuízos advindos das inundações ribeirinhas podem ser adotadas medidas estruturais e não estruturais. De acordo com Tucci (2006) e Dornelles (2007), as primeiras condizem com obras de engenharia, que provocam ou não a alteração do corpo hídrico, tais como diques, represas e canais para desvio do escoamento. Ambos os autores ressaltam que esta tipologia de medida é onerosa e projetada para determinado tempo de recorrência das inundações, sendo que em situações além das previstas, os impactos são significativos, pois cria uma falsa ideia de segurança na população que ocupa áreas inundáveis. Já, as medidas não estruturais são de caráter preventivo, em que a população convive com as cheias. Estas são representadas pelo zoneamento de áreas inundáveis, considerando a maior cheia já registrada ou por tempos de retorno; remoção definitiva ou não das famílias para locais mais elevados e seguros; além da implantação de sistemas de alerta e previsão de enchentes. Neste último, enquadram-se os métodos de previsão hidrológica das cheias, que permitem estimar com antecedência as cotas futuras dos recursos hídricos, o que facilita a tomada de decisões para remoção das famílias que vivem em áreas de risco e, consequentemente diminui os prejuízos.

Existem diversos modelos hidrológicos que podem ser empregados para prever as cheias, sendo destacados por Oliveira, Guasselli e Saldanha (2012) os de chuva-vazão, que convertem a precipitação em vazão, sendo necessário para tanto conhecer preliminarmente a dinâmica hidrológica da bacia de interesse; os de propagação da vazão, que realizam a previsão da vazão a partir de dados de nível/e ou vazão de uma seção a montante da de interesse; e os de relação cota-cota, em que os níveis na seção de interesse são estimados considerando os níveis registrados a montante. Os autores ressaltam que nos dois primeiros modelos, é necessário estabelecer uma relação confiável entre os dados de vazão e níveis atingidos pelo rio, visto que os valores isolados de vazão não permitem a identificação dos locais que serão atingidos. A

escolha do modelo a ser aplicado depende das informações disponíveis, da precisão desejada e dos custos envolvidos. WMO (2011) complementa que não existe um modelo específico que possa ser considerado como mais adequado para a previsão de inundações, visto que cada tipologia apresenta vantagens e desvantagens.

O Vale do Taquari, localizado na porção inferior da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, Rio Grande do Sul (RS), apresenta problemas recorrentes com inundações, tanto do rio Taquari como de seus afluentes. Segundo Ferri (1991), as grandes flutuações de vazão da bacia hidrográfica, decorrentes de elevadas e longas precipitações, fazem com que se concentrem rapidamente altos volumes de água e escoem rio abaixo, elevando os seus níveis. E, onde o relevo é mais plano e com grande concentração de núcleos urbanos, são observados os maiores prejuízos ocasionados por estes eventos extremos. Logo, as inundações que ocorrem no Vale do Taquari têm influência de fatores naturais da bacia, como hidrografia, relevo, clima e vegetação (BOTH; FERREIRA, 2001). Dentre os municípios atingidos no Vale, encontra-se Lajeado, que está localizado nas margens do rio Taquari, na região central e mais plana do Vale. O município apresenta 71.445 habitantes e área territorial de 90,087 km² (IBGE, 2010), e é afetado pelas inundações, em média, uma vez por ano (MORAES, 2015).

Visto a elevada recorrência deste evento extremo na cidade, já foram desenvolvidos vários estudos envolvendo as inundações em Lajeado, tanto para o mapeamento e delimitação das áreas inundáveis do município, bem como as edificações atingidas pelas diferentes cotas do rio Taquari (ECKHARDT, 2008, DIEDRICH et al., 2010; MORAES, 2015); como para a elaboração de modelos matemáticos do tipo cota-cota para previsão de níveis em Lajeado com base nos dados fluviais de Encantado e Muçum (ECKHARDT, 2008; DIEDRICH et al., 2010; CIH, 2013; KUREK, 2016). Os resultados obtidos nesses modelos de previsão foram satisfatórios, contudo, em estudo preliminar realizado por Gerhard et al. (2015), ao considerar os dados de precipitação da bacia hidrográfica complementar, entre Lajeado e Encantado, com os dados de pico das cotas atingidas nestes municípios, tem-se uma melhora na previsão de níveis em Lajeado. Considerando isto, o presente estudo tem o intuito de aprofundar os achados de Gerhard et al. (2015), além de elaborar modelos de previsão com dados contínuos de nível e chuva, a fim de verificar qual das abordagens apresenta maior precisão na previsão de níveis de inundação. Cabe ressaltar que os modelos desenvolvidos são do tipo empírico, envolvendo a relação entre níveis fluviais (cotas) e chuvas registradas na bacia complementar (área não monitorada, localizada entre as estações de jusante e montante).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar duas abordagens matemáticas para a previsão de níveis fluviais de inundação na cidade de Lajeado, RS. A primeira abordagem se refere a modelos matemáticos que consideram uma série pareada de níveis máximos de cheia e inundação atingidos em Lajeado e Encantado, e a chuva ocorrida na bacia hidrográfica complementar entre estes municípios. A segunda abordagem leva em consideração a aplicação de modelos matemáticos para a simulação de séries horárias contínuas de níveis fluviais, considerando a cota horária registrada em Lajeado e Encantado, além da chuva ocorrida na bacia hidrográfica complementar.

2.2 Objetivos específicos

- Organizar e consistir um conjunto de dados hidrometeorológicos;
- Calibrar diferentes modelos matemáticos para a previsão de níveis fluviais de inundação para Lajeado;
- Avaliar o desempenho dos modelos matemáticos, e discutir a sua aplicabilidade e forma de implementação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Ciclo hidrológico

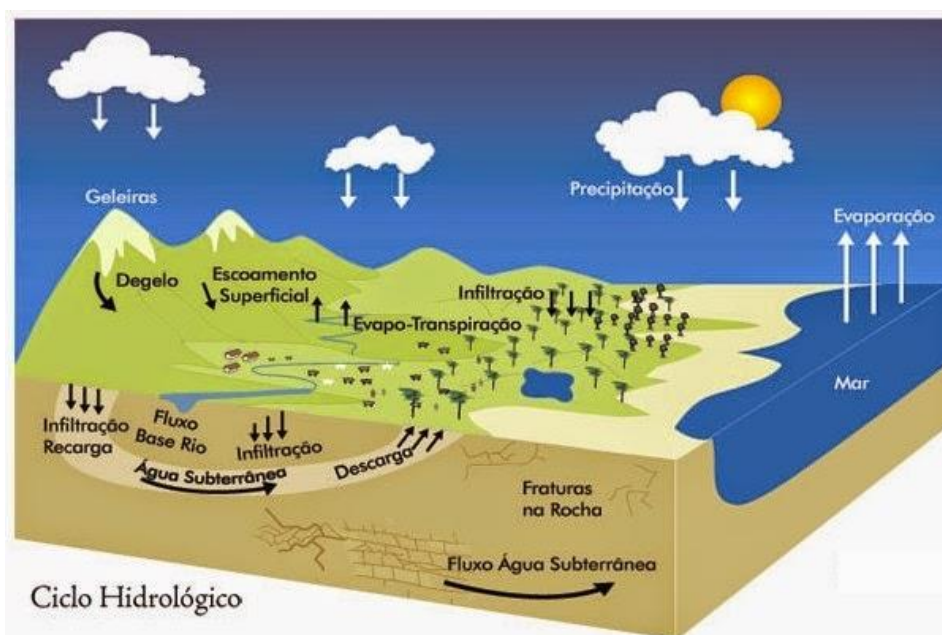
O ciclo hidrológico, a nível global, é um sistema fechado de circulação da água entre a atmosfera e a superfície terrestre, uma vez que a quantidade de água no planeta se mantém constante. Já, a nível regional, o ciclo é aberto, pois nem toda água evaporada em determinado local precipita na mesma bacia hidrográfica. Esta dinâmica é acionada pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2013; SILVA, 2015). De acordo com Tucci (2013) o intercâmbio de água entre a atmosfera e a superfície terrestre ocorre em dois sentidos: superfície-atmosfera e atmosfera-superfície. No primeiro, o fluxo da água ocorre basicamente no estado gasoso (vapor), decorrente dos processos de evaporação e de transpiração, também denominados de modo combinado como evapotranspiração. No segundo, ocorre a transferência de água em qualquer estado físico, mas, destacam-se as precipitações de chuva, neve e granizo.

Miguez, Veról e Rezende (2016) ressaltam que além da precipitação, evaporação e transpiração também constituem parte do ciclo hidrológico a infiltração, a interceptação, o armazenamento superficial e subterrâneo, o escoamento superficial, subsuperficial e o subterrâneo, entre outros, conforme representado na Figura 1 e descrito a seguir.

As precipitações se formam, principalmente, a partir da ascensão de uma massa de ar quente e úmido, por diferentes meios, como a convecção, radiação, ação orográfica e sistemas dinâmicos, tal como a frontogênese. Ao atingir os níveis mais elevados da atmosfera, o ar se expande, pois, a pressão atmosférica diminui com a altitude, e também se resfria, devido à expansão sofrida, já que uma mesma quantidade de calor tem que ser distribuída em um volume maior de ar. Este processo é chamado de resfriamento adiabático (STEINKE, 2012). Ao resfriar

até o ponto de orvalho¹, inicia-se a condensação do vapor d'água sobre os chamados núcleos de condensação, que são sais, partículas, poeiras ou superfícies onde a água na fase gasosa tem uma base de apoio para retornar à fase líquida, e onde é facilitado o agrupamento de pequenas gotículas, que se transformam em gotas maiores. Este processo dá origem às nuvens, que são uma mistura de ar e gotículas de água em estado líquido ou sólido, que ficam suspensas pelo efeito da turbulência do meio atmosférico e pela ação de correntes de ar ascendentes (FERREIRA, 2006; STEINKE, 2012; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). De acordo com Tucci (2013), para que essas gotas precipitem, na forma de chuva, neve ou granizo, é necessário que apresentem peso maior que as forças que as mantêm em suspensão, consequentemente, a velocidade de queda será superior às componentes verticais ascendentes. Quando a velocidade é muito elevada, a gota se deforma e se subdivide em gotas menores.

Figura 1 – Ciclo hidrológico e seus principais componentes



Fonte: MMA (2017).

As precipitações podem ser classificadas de acordo com o mecanismo fundamental que propicia a ascensão do ar, existindo três tipos principais, que são a chuva convectiva, a chuva orográfica e a chuva frontal. Na primeira tipologia, os movimentos verticais, que caracterizam a convecção, resultam do aquecimento do ar úmido, através do contato com a superfície do solo aquecida pelo sol, que se expande e ascende para os níveis superiores da atmosfera. À medida

¹ O ponto de orvalho é definido como a temperatura à qual o ar úmido deve ser resfriado para que fique saturado, ou seja, apresente a quantidade máxima de vapor de água (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

que sobe, ele se resfria adiabaticamente, atinge seu ponto de saturação, condensa e há a formação de nuvens (MENDONÇA; DANI-OLIVEIRA, 2007). É uma precipitação intensa e rápida, comumente associada a temporais, que ocorre, geralmente, entre o final da tarde e o início da noite. Estas costumam ocorrer de forma localizada e podem provocar enxurradas em bacias hidrográficas de menor porte, e alagamentos em bacias urbanizadas. No Rio Grande do Sul, este tipo de precipitação é mais frequente durante o verão, quando se tem maior aporte de radiação solar e umidade para dentro do continente (CAVALCANTI et al., 2009).

Já as chuvas orográficas, de acordo com Steinke (2012), ocorrem quando o ar quente e úmido, que geralmente sopra dos oceanos em direção ao continente, sofre uma interferência física do relevo, que impede a livre movimentação do ar, forçando-o a se elevar, o que favorece a formação de nuvens de chuva. Marin, Assad e Pilau (2008) comentam que é em virtude deste fenômeno, que as áreas montanhosas a barlavento recebem muito mais chuva que as de sotavento, efeito denominado de “sombra de chuva”. Esta precipitação apresenta, normalmente, pequena intensidade, mas uma grande duração, além de cobrir uma pequena área (TUCCI, 2013). Segundo Collischonn e Dornelles (2013), no Rio Grande do Sul estas chuvas ficam mais restritas às regiões serranas, referente à escarpa do Planalto no norte do estado, já que dependem da variação do relevo para se formarem.

As chuvas frontais provêm da interação entre massas de ar distintas, em termos de temperatura e pressão atmosférica. Na frente de contato entre as duas massas de ar, fria e quente, o ar mais quente e úmido é impulsionado para cima, resultando no seu resfriamento e na condensação do vapor de água, produzindo chuvas. As precipitações frontais são geralmente mais duradouras, costumam atingir áreas extensas e podem induzir a ocorrência de cheias e inundações em grandes bacias (TUCCI, 2013).

No Rio Grande do Sul, estas chuvas são ocasionadas pelo encontro da massa de ar Polar Atlântica, que avança do quadrante sul para nordeste, com a massa de ar Tropical Atlântica, dando origem ao sistema frontal (BRITTO; BARLETTA; MENDONÇA, 2006). Geralmente esses sistemas se deslocam rapidamente pelo Estado, mas, quando interagem com a corrente de Jato Subtropical² mais intensa do que o normal, apresentam uma tendência de ficar quase

² A corrente de Jato Subtropical (JST) é definida como uma corrente de ar que escoar no formato de um conduto quase horizontal, de oeste para leste, próximo à tropopausa. No hemisfério sul, ela está localizada entre as latitudes 20° e 40° S, geralmente a 13.000 m de altitude. As velocidades da JST variam ao longo do ano, devido às diferenças de gradiente de temperatura, sendo mais elevadas no inverno (45 m.s⁻¹) e menos intensas no verão (32 m.s⁻¹) (REBOITA, 2004; CAVALCANTI et al., 2009).

estacionárias, resultando em volumes expressivos de chuva, ocasião em que aumentam as chances de ocorrência de eventos extremos hidrológicos (KOUSKY; CAVALCANTI, 1984 apud FEDOROVA; LEVIT; CARVALHO, 2007). Rossato (2011) ressalta que, normalmente, há uma intensificação das correntes de jato em média e alta altitude em anos de *El Niño*, devido ao aumento do gradiente de temperatura entre os Polos e o Equador, favorecendo o bloqueio da passagem das frentes frias. Segundo Collischonn e Dornelles (2013), no RS, as chuvas frontais ocorrem preferencialmente entre o outono e a primavera, com maior recorrência durante o inverno. É importante destacar ainda que de acordo com estudo realizado por Wollmann (2014), na bacia hidrográfica do Guaíba, em que a área deste estudo está inserida, as cheias são desencadeadas, principalmente, por chuvas frontais, sendo que, entre 2000 e 2011, cerca de 72,6% foram de caráter estacionário.

Ao precipitar a chuva já pode sofrer o processo de evaporação, sendo que em algumas regiões este processo é tão expressivo que ela pode ser totalmente vaporizada. Se for atingir a superfície terrestre com vegetação, ela será interceptada, de modo que a capacidade deste processo ocorrer depende da densidade vegetal, do tipo de vegetação, do tipo e forma das folhas, ramos e caule, bem como da intensidade, duração e frequência da chuva, podendo em seguida ser evaporada ou atingir o solo (BERNARD; TUTTLE, 1998; TUCCI, 2013). No momento em que todo o volume retido pelas plantas é evaporado, elas passam a perder umidade para o ambiente por meio da transpiração. Essa umidade é obtida do solo, por intermédio das raízes (TUCCI; BRAGA, 2003). Collischonn e Dornelles (2013) comentam que além da interceptação vegetal, este processo também ocorre devido às depressões impermeáveis, sendo que em ambos os casos a água fica disponível para evaporação, o que diminui o escoamento superficial e o pico das cheias.

Ao atingir o solo a água pode infiltrar em virtude das forças de capilaridade e gravidade, de modo que as camadas vão sendo umidificadas de cima para baixo, criando um gradiente de umidade. Com a manutenção da precipitação, o solo tende a saturar em toda a sua profundidade, porém, inicialmente, nas camadas junto à superfície. A partir deste momento, a água pode ficar armazenada em depressões superficiais naturais, ou dar início ao escoamento superficial, que pode infiltrar novamente se houverem condições propícias (RODRIGUES; MENDIONDO, 2013; TUCCI, 2013). Quando a chuva cessa, parte da água é retornada para a atmosfera pela evapotranspiração e parte se redistribui no interior do solo, de tal forma que o perfil de umidade se inverte, ficando mais úmido ao fundo e mais seco na superfície, o que garante a retomada da capacidade de infiltração. A água que percola pelo interior do solo pode alimentar os aquíferos

ou dar origem ao escoamento subsuperficial nos canais internos do solo até encontrar a superfície, quando aflora como nascente e volta a escoar superficialmente, ou algum corpo hídrico (TUCCI; BRAGA, 2003; TUCCI, 2013). Gribbin (2013) salienta que o escoamento no subsolo (subsuperficial) e no lençol freático (subterrâneo) é muito mais lento do que o superficial, podendo durar vários dias. É por isso, que mesmo em períodos sem chuva, os corpos hídricos continuam sendo abastecidos, neste caso, pelo escoamento de base.

De acordo com Tucci e Braga (2003) e Collischonn e Dornelles (2013) a capacidade de infiltração depende do tipo e uso do solo, dos índices de umidade, das características químicas e estruturais do solo, da cobertura vegetal e da intensidade da chuva. Por isso em solo argiloso seco, a capacidade de infiltração é, normalmente, elevada. Mas, à medida que vai umidificando, sua capacidade diminui, podendo quase se tornar impermeável. Em solos cobertos de vegetação a taxa de infiltração também é elevada, ao contrário de solos descobertos, compactados ou impermeabilizados, em que se tem uma diminuição significativa da infiltração, o que consequentemente contribui para o aumento do escoamento superficial e para os picos de cheias. Além disso, quando a intensidade da chuva é superior à capacidade de infiltração do solo, também é fomentando o escoamento superficial.

Conforme comentado anteriormente, dependendo da intensidade da chuva e da capacidade de infiltração do solo, parte da água não consegue infiltrar e se acumula na superfície. Quando o relevo é declivoso, dá-se origem ao escoamento superficial. Ou seja, a gravidade impulsiona a água excedente pela superfície para as zonas mais baixas, na forma de pequenos filetes ou pequenos córregos temporários, que convergem rapidamente e alimentam os corpos de água superficiais (rios, lagos, reservatórios e oceano), constituindo a rede de drenagem (KARMANN, 2009; RODRIGUES; MENDIONDO, 2013). Segundo Tucci (2013), quando houver a presença de vegetação no terreno, esta atua como um obstáculo e diminui a velocidade de escoamento, criando condições de infiltração no decorrer do percurso, da mesma forma como diminui os processos erosivos e, consequentemente, os de assoreamento dos corpos hídricos. Miguez, Veról e Rezende (2016) ressaltam ainda que é o escoamento superficial um dos grandes responsáveis pelas cheias nas bacias hidrográficas.

Por fim, Collischonn e Dornelles (2013) esclarecem que a água que precipita retorna para a atmosfera por intermédio do processo de evapotranspiração, fechando-se o ciclo hidrológico. Cabe lembrar que a evapotranspiração é a combinação entre os processos de evaporação e transpiração, a qual tem forte influência na quantidade de água que é

transformada em vazão numa bacia hidrográfica. A evaporação consiste na transferência de água líquida oriunda de lagos, poças d'água, rios, gotas de orvalho e da umidade do solo, em forma de vapor para a atmosfera. Bernard e Tuttle (1998) ressaltam que o processo de evaporação da umidade do solo é muito lento, devido à capilaridade e as forças osmóticas que mantêm a água no solo. Já a transpiração é definida pela retirada de água pelas raízes das plantas, sua condução até as folhas e a transferência para a atmosfera no formato gasoso, pelos estômatos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). De acordo com Tucci (2013) cerca de 70% da evaporação é proveniente dos oceanos, e os 30% restantes, da evapotranspiração dos continentes, sendo que estes processos só ocorrem de forma natural se houver a entrada de energia do sol e/ou da atmosfera no sistema.

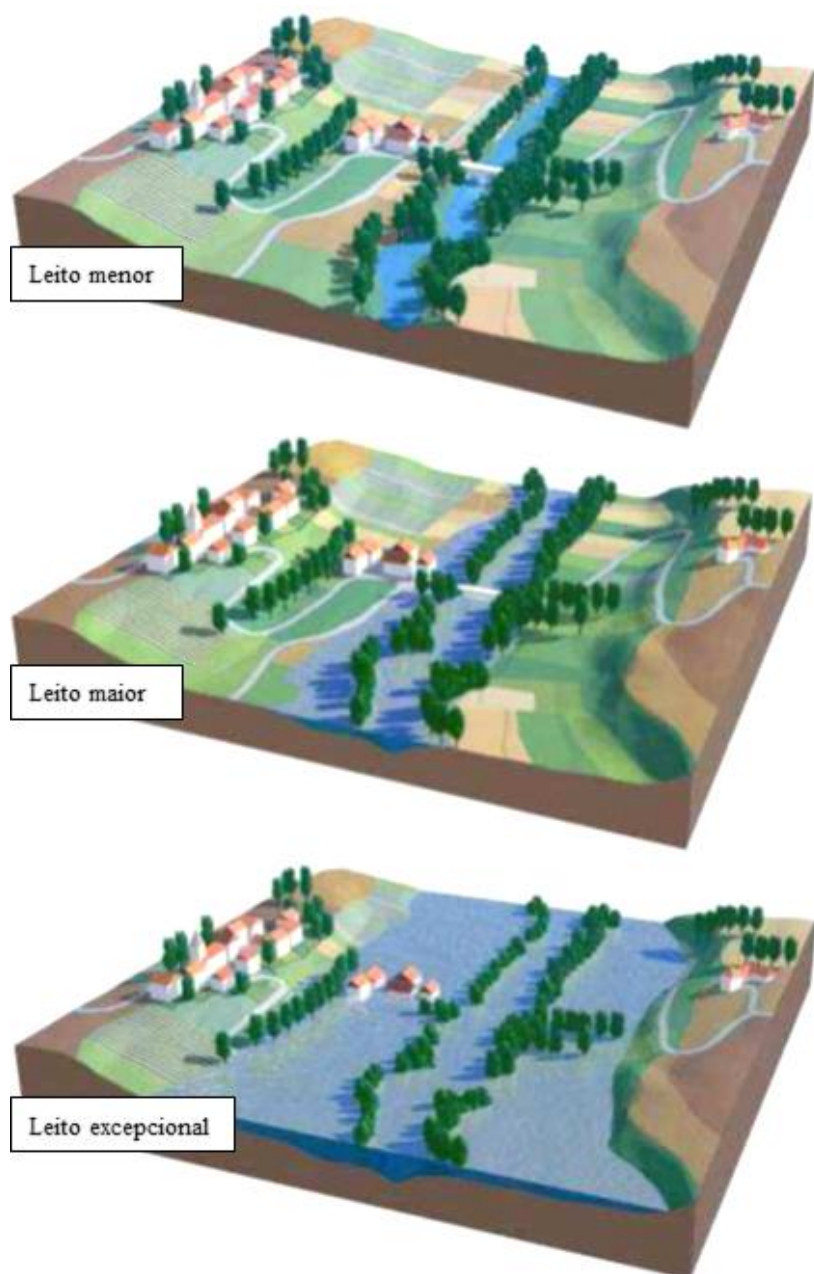
3.2 Enchentes, inundações e enxurradas: definições e problemática

Enchentes são eventos hidrológicos extremos decorrentes de precipitações intensas e com duração suficiente para ultrapassar a capacidade de interceptação vegetal, do armazenamento temporário e de infiltração de água no solo, gerando vazões extremas, que escoam superficialmente e alcançam simultaneamente os corpos hídricos, elevando os seus níveis e podendo acarretar em inundações nas áreas mais planas e baixas das planícies e terraços marginais (SILVA, 2006). Oliveira, Guasselli e Saldanha (2012) destacam que esses eventos ocorrem de forma natural em todos os ambientes fluviais e são essenciais para manter a dinâmica hidrológica e os processos geomorfológicos.

De acordo com Santos (2007) e Oliveira (2010), quando a capacidade de escoamento de um corpo hídrico é ultrapassada, tem-se o extravasamento das águas do leito menor, que em rios perenes sempre apresenta escoamento, para o leito maior, ou ainda, para o leito maior excepcional (planície de inundação), conforme representado na Figura 2. Este evento de inundação é temporário e, após a passagem da onda de cheia, as águas retornam à calha menor do recurso hídrico, permanecendo nas áreas adjacentes, os materiais trazidos pela cheia. Em média, o leito maior é inundado a cada 1,5 a 2 anos (TUCCI; BERTONI, 2003). Já, o leito maior excepcional é atingido por cheias com período de retorno superior a 2 anos (OLIVEIRA, 2010). Cabe ressaltar que quando o nível d'água se eleva até atingir o limite máximo da calha do corpo hídrico, tem-se uma enchente. Já a partir do momento, que as águas transbordam para as várzeas, tem-se uma inundação (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Por isso,

Oliveira (2010) enfatiza que a inundação é uma consequência da enchente, e, constitui-se no estágio mais avançado da cheia. Além disso, é importante destacar, que por ser um processo dinâmico, um recurso hídrico pode apresentar trechos com características de enchente, e outros, com características de inundação (BRASIL, 2007).

Figura 2 – Representação do leito menor, maior e excepcional de um corpo hídrico



Fonte: Da autora, adaptado de Prim.net - Cítoyen (2008) apud Collischonn (2009).

A Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), instituída pela Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012, classifica os eventos hidrológicos extremos em três subgrupos: enxurradas, inundações e alagamentos (BRASIL, 2012). De acordo com Santos

(2007), WMO (2011) e WHO (2013) as enxurradas são o resultado de chuvas curtas e intensas, de caráter convectivo. Elas costumam ocorrer em pequenas bacias, com declives íngremes e baixa capacidade de infiltração, o que contribui para o aumento do escoamento superficial. As enxurradas apresentam elevada força de correnteza e, por isso, possuem ampla capacidade de transporte de materiais e de destruição, como de casas, pontes e estradas. Ambos os autores ressaltam que o tempo de previsão anterior ao evento é curto, mas, atualmente é facilitado pelo acompanhamento da projeção de chuva pelo radar.

As inundações ocorrem devido à ocorrência de chuvas mais generalizadas e duradouras sobre grandes bacias, como as de caráter frontal, e, em virtude do solo saturado, havendo a subida lenta e progressiva da água e seu transbordamento para as áreas ribeirinhas, que ficam inundadas por vários dias. Como a subida dos níveis é gradual, a previsão é mais fácil, podendo ter antecedência de horas ou até mesmo dias, variando conforme as características físicas da bacia e dos rios (SANTOS, 2007; WMO, 2011; WHO, 2013).

Já, o alagamento consiste no acúmulo de água no leito das ruas e em outros pontos do perímetro urbano. Este processo é decorrente de fortes precipitações combinadas a sistemas de drenagem deficientes ou obstruídos, os quais não são capazes de escoar a água da chuva na mesma velocidade que ela atinge os espaços urbanos (CASTRO, 1998).

Embora as cheias e inundações façam parte da dinâmica natural dos corpos hídricos, as atividades humanas são capazes de alterar o ciclo hidrológico, tanto no espaço urbano como rural, podendo contribuir para o aumento da frequência e magnitude das enchentes, que dependem de diversas variáveis como, a distribuição e intensidade da precipitação, da taxa de infiltração e do grau de saturação do solo, e das características da bacia de drenagem (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). É importante ressaltar que na bacia Taquari-Antas, onde o município de Lajeado, alvo deste estudo, está inserido, não há evidências de que as cheias foram potencializadas por fatores antrópicos. Isto é comprovado pela série histórica de inundações de Lajeado, apresentada por Moraes (2015), em que não há tendência de aumento na frequência e/ou magnitude dos eventos. Estes eventos extremos são causados por características naturais da bacia, conforme será abordado no Subcapítulo 3.3, a seguir.

Segundo Miguez, Veról e Rezende (2016), o grande desenvolvimento urbano ocorrido, principalmente, a partir do final do século XX provocou mudanças na cobertura do solo para expansão da área edificada, havendo, essencialmente, a remoção de vegetação, aterramento das

áreas de várzea e a impermeabilização do terreno. Tais alterações acabam por diminuir os processos de infiltração e armazenamento temporário em depressões naturais, o que impulsiona maior escoamento superficial, que, consequentemente, agrava as cheias. De acordo com os autores supracitados, em bacias amplamente urbanizadas, pode-se dizer que as modificações provocadas pelo homem aumentam e adiantam o pico de uma cheia, visto que mais água escoar superficialmente e numa velocidade maior, devido à diminuição de retenções superficiais e da cobertura vegetal. Da mesma forma que pode potencializar os alagamentos, visto que os sistemas de drenagem urbanos são muitas vezes mal dimensionados ou estão obstruídos por resíduos sólidos, e não comportam o aumento da vazão pluvial (OLIVEIRA; GUASSELLI, 2011).

No espaço rural, a substituição da vegetação natural por cultivos agrícolas, também diminui o processo de interceptação e de infiltração, favorecendo maior escoamento superficial, erosão, assoreamento e intensificação das cheias (OLIVEIRA, 2010). Contudo, é importante salientar que as inundações das várzeas com cultivos agrícolas são benéficas, pois aumentam o aporte de nutrientes (SANTOS, 2007).

Tucci (2013) complementa que o crescimento urbano acelerado também resultou numa maior ocupação das áreas ribeirinhas, as quais são periodicamente inundadas. Apesar destes espaços serem ocupados, desde que o homem deixou de ser nômade, em vista da necessidade de água, tanto para o consumo como para o transporte, a população mais antiga e com experiência com as enchentes, bem como aqueles com maior poder aquisitivo, passaram a se estabelecer em locais mais elevados e seguros. No entanto, muitos daqueles que migraram para as cidades, por serem de baixa renda, foram se estabelecendo espontaneamente nos locais desprezados pelo restante da população (TUCCI, 2004). Tucci e Bertoni (2003) destacam que a população que ainda não conviveu com as cheias ou que se esqueceu destes eventos, por ter decorrido um longo período sem ocorrência, cria uma falsa ideia de segurança, desprezando os riscos associados na habitação destes locais.

Salienta-se que a população ao habitar as margens dos corpos hídricos, além de lhe inferir características artificiais capazes de potencializar as cheias, transforma a inundação, fenômeno natural daquele espaço, num desastre natural. Pois, de acordo com Kobiyama et al. (2006), quando um fenômeno que ocorre naturalmente em determinado ambiente atinge locais ocupados pelos seres humanos, causando-lhes danos materiais e humanos, além de prejuízos socioeconômicos, passa a ser denominado de desastre natural. É importante destacar, que o

banco de dados mundial de desastres conhecido como *Emergency Events Database* (EM-DAT), desenvolvido e administrado pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) da Universidade de Louvain – Bélgica, caracteriza um evento natural ou tecnológico como desastre, se pelo menos um dos seguintes critérios forem atendidos: dez ou mais pessoas mortas; cem ou mais pessoas afetadas; declaração de estado de emergência; ou, pedido de assistência internacional (EM-DAT, 2017).

Os impactos causados pelas cheias são variados e podem ser classificados como diretos ou indiretos. Sendo os da primeira categoria representados pelas mortes por afogamento, destruição das residências, perdas materiais diversas e também gastos com a recuperação. Já, os efeitos indiretos condizem, principalmente, com a contração de doenças de veiculação hídrica, tais como a leptospirose e a hepatite (BRASIL, 2007).

Conforme o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED/UFSC, 2013), no Brasil, ao longo de 22 anos, entre 1991 e 2012, ocorreram 8.056 registros de enxurradas e alagamentos, representando a segunda categoria de desastres de maior ocorrência, equivalente a 20,6% do total. Já, as inundações estão em terceiro lugar, sendo registrados 4.694 eventos, que representam 12% do total de desastres. O desastre mais recorrente no Brasil se refere às secas e estiagens, as quais representam um percentual de 51,3%. No entanto, é importante ressaltar que foram as inundações e enxurradas as responsáveis por 71,55% do total de óbitos decorrentes de desastres naturais no país, durante o mesmo período. No Rio Grande do Sul (RS), entre 1991 e 2012, as estiagens também estão em primeiro lugar dentre os desastres registrados com um percentual de 53,6% (3.110 registros). As enxurradas encontram-se em segundo lugar com 17,4% (1.006 registros), e as inundações, em quinto lugar, representando 7,1% (413 registros) do total de desastres registrados. Embora, os eventos de cheia não estejam em primeiro lugar dentre os desastres ocorridos no RS, eles afetaram, ao longo de 22 anos, cerca de 3 milhões de pessoas, sendo que destes, 46 vieram a óbito. Além disso, danificaram e destruíram mais de 1 milhão de construções e infraestruturas, representando um percentual de 46% dentre todos os desastres (CEPED/UFSC, 2013).

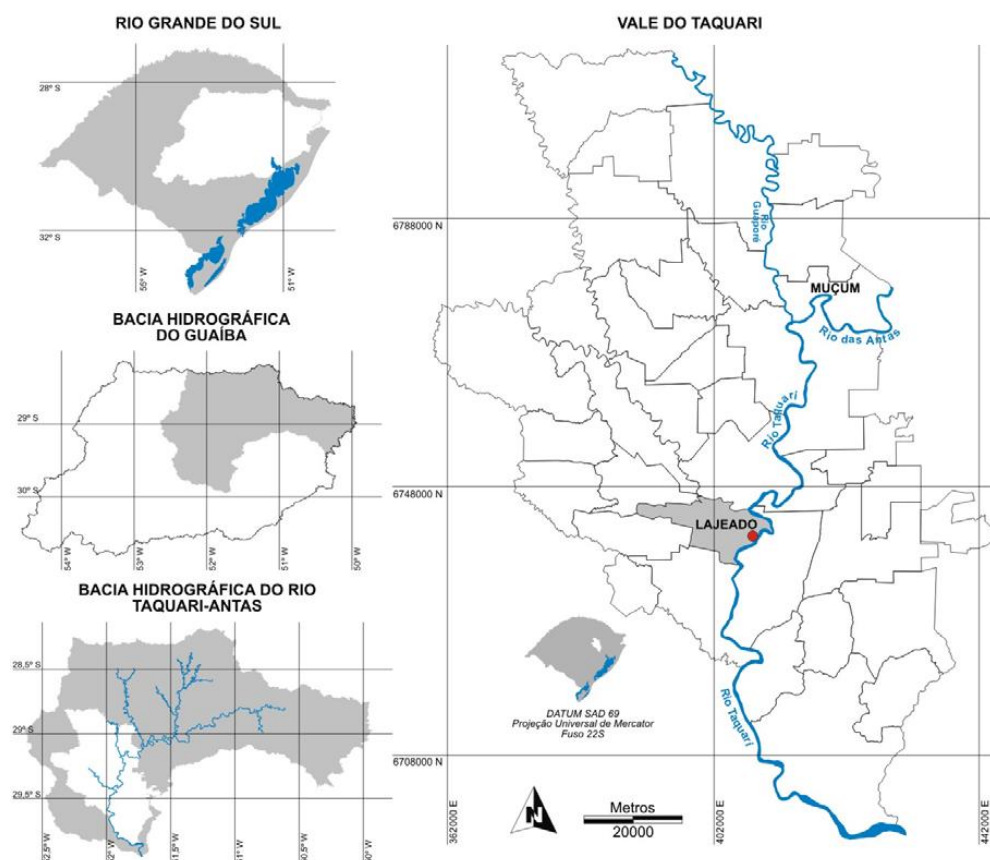
Frente a estes dados, nota-se a importância de investimentos em medidas de controle para diminuir os riscos e danos associados às cheias, sobretudo naqueles que visam trabalhar com a prevenção do desastre, podendo-se destacar os sistemas de previsão e alerta às enchentes, a serem detalhados no Subcapítulo 3.5. De acordo com Oliveira, Guasselli e Saldanha (2012), o contínuo aperfeiçoamento destes sistemas, constitui-se numa importante ferramenta para

tomada de decisão dos órgãos públicos responsáveis para remoção, deslocamento e posterior realocação das comunidades ribeirinhas, facilitando-se a convivência do homem com este evento extremo.

3.3 Inundações no Vale do Taquari

O Vale do Taquari (FIGURA 3), localizado na porção centro-leste do RS, é composto por 36 municípios e apresenta área total de 4.821,1 km², equivalente a 1,71% da área do estado (ALVES et al., 2013). A população da região representa 3,07 % da estadual, contando com 327.822 habitantes (IBGE, 2010). O Vale está inserido na porção inferior da bacia hidrográfica Taquari-Antas, uma das sub-bacias da bacia hidrográfica do Guaíba, e apresenta área de 26.428,00 km² (9% do território estadual) (FEPAM, 2017).

Figura 3 – Representação do Vale do Taquari, destacando-se o município de Lajeado



Fonte: Eckhardt (2008).

As nascentes do rio Taquari se localizam no extremo leste da bacia Taquari-Antas, no Planalto dos Campos Gerais, a uma altitude de 1200 m. Deste ponto, até a confluência com o rio Carreiro, no município de São Valentim do Sul, o rio percorre 390 km no sentido leste-oeste sob o nome rio das Antas. A partir daí, o rio passa a ser chamado de Taquari, e percorre mais 140 km, no sentido norte-sul, até desembocar no rio Jacuí, nas proximidades de Triunfo, onde a altitude é inferior a 20 metros (BOMBASSARO; ROBAINA, 2010; FEPAM, 2017).

De acordo com Both e Ferreira (2001), o Vale do Taquari é frequentemente atingido por inundações, as quais causam transtornos significativos à população ribeirinha. Os autores esclarecem que esses fenômenos ocorrem em virtude das características naturais da bacia Taquari-Antas como o clima, hidrologia, pedologia, geomorfologia, dentre outros.

Ferri (1991) comenta que quando ocorrem chuvas contínuas distribuídas pela extensa área da bacia, grandes volumes de água escoam superficialmente, em virtude da baixa profundidade e permeabilidade do solo, sobretudo no alto curso do rio Taquari-Antas. A água é rapidamente drenada pelos afluentes e alcança simultaneamente, com poucas horas de discrepância, o rio principal, resultando em grandes variações da vazão (FERRI, 1991; KUREK, 2016). Devido à elevada declividade da bacia, as águas escoam rapidamente rio abaixo até perder velocidade nas imediações da cidade de Muçum, onde as cotas são menores e as margens do rio se alargam. Ao longo de todo o corpo hídrico, as águas provocam inundações, mas, principalmente, no baixo curso do rio Taquari, que apresenta amplas planícies e terraços fluviais. Neste trecho, também pode ocorrer forte variação de nível, por conta do represamento das águas do rio Taquari pelo rio Jacuí, ou ainda, por ventos fortes de quadrante sul, que sopram em determinadas épocas do ano (FERRI, 1991; BOMBASSARO; ROBAINA, 2010).

Ainda de acordo com Ferri (1991), é justamente no baixo curso do rio Taquari, que ocorrem os maiores prejuízos associados às enchentes, visto que se tem o maior aglomerado de núcleos urbanos, os quais foram historicamente se estabelecendo nas proximidades dos recursos hídricos, devido à facilidade de transporte e escoamento da produção, quando a navegação estava no auge; baixo custo dos lotes em áreas inundáveis; ou ainda pela expansão da periferia das cidades.

Segundo Moraes (2015), 10 municípios do Vale do Taquari margeiam o rio Taquari e, são, conseqüentemente, atingidos pelas cheias, sendo eles: Muçum, Roca Sales, Encantado,

Colinas, Arroio do Meio, Estrela, Lajeado, Cruzeiro do Sul, Bom Retiro do Sul e Taquari. E, conforme inventário realizado no estudo de Bombassaro e Robaina (2010), entre os anos de 1980 e 2007, os municípios da bacia hidrográfica Taquari-Antas mais atingidos por inundações foram Estrela e Lajeado, que juntos contabilizaram 27% dos casos ocorridos.

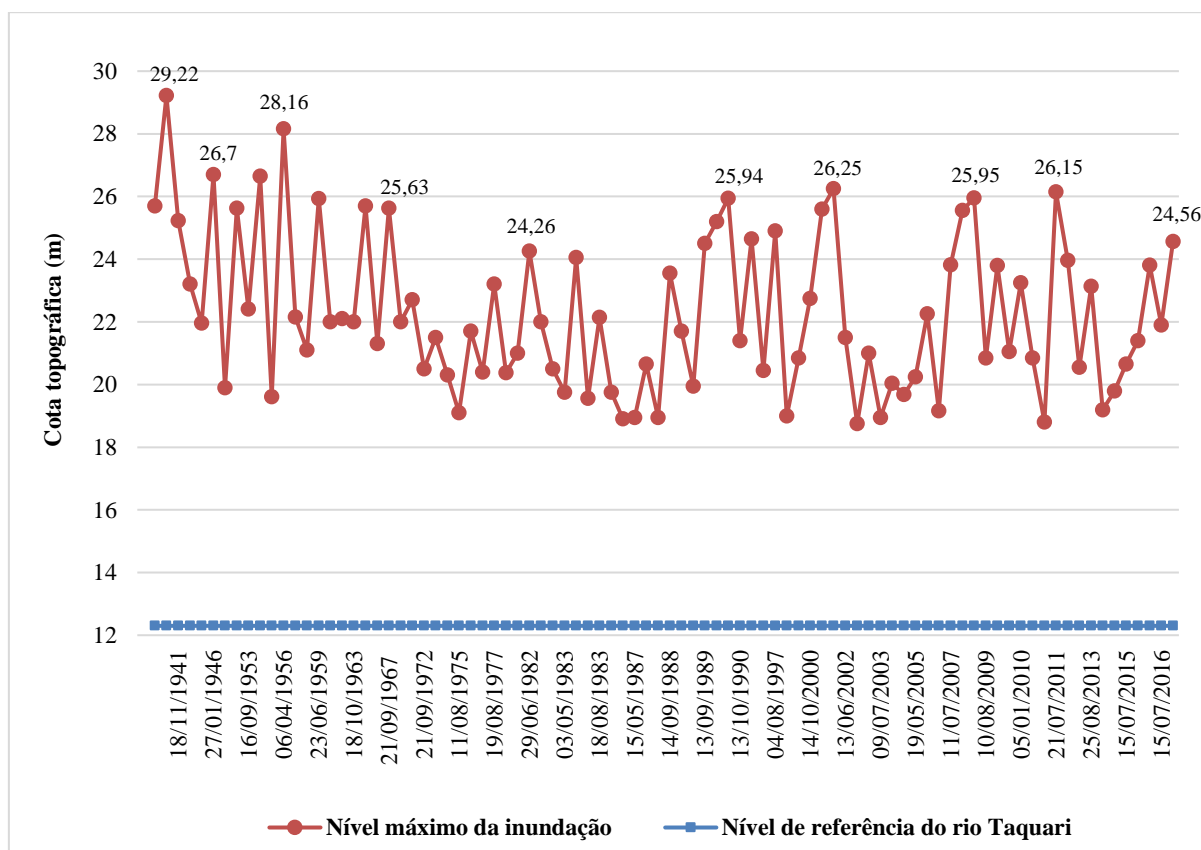
Destaca-se, que entre 1940 e 2016, um período de 77 anos, o município de Lajeado foi atingido por 88 eventos de cheia, conforme pode ser observado no Gráfico 1. A organização destes registros foi realizada pelo antigo coordenador da AHSUL (Administração das Hidrovias do Sul), Luiz Fay de Azambuja, e pelo Centro de Informações Hidrometeorológicas da Univates, considerando as leituras efetuadas no Porto Fluvial de Estrela. Os dados foram recentemente consolidados por Moraes (2015), baseando-se nas pesquisas de Greiner (2014), a fim de compatibilizar os níveis de inundação da série histórica vinculados às réguas linimétricas do Porto Fluvial de Estrela com a nova Rede de Referência de Nível implantada no município de Lajeado no ano de 2013. Em virtude disso, houve a subtração de 0,70 m de cada um dos níveis de inundação da série histórica. Da mesma forma, o referencial de nível das águas do rio Taquari no Porto de Estrela, que era de 13 m, passou a 12,30 m. É importante salientar também que o município de Lajeado é inundado a partir do momento que as águas do rio Taquari ultrapassam a cota topográfica de 18,3 m no Porto Fluvial de Estrela.

Avaliando o Gráfico 1 percebe-se que a maior inundação já ocorrida foi registrada em 06 de maio de 1941, quando o nível máximo atingido pelas águas do rio Taquari chegou aos 29,22 m. Neste evento, as águas do rio ficaram 16,92 m acima do nível normal. De acordo com o estudo de Moraes (2015), o tempo de retorno (TR) - intervalo médio, em anos, que um evento de inundação pode ser igualado ou superado (SANTOS, 2007) – para este nível extremo³ é de 131,58 anos. Já, a probabilidade de ocorrência (P) – número de vezes que um evento de determinada magnitude é igualado ou superado num intervalo de tempo (SANTOS, 2007) – de um evento desta magnitude ocorrer dentro de um ano é de 0,76%. Na penúltima inundação ocorrida em 15 de julho de 2016 as águas do rio Taquari ficaram 9,6 m acima do normal e atingiram o nível de 21,9 m, caracterizando-a como uma inundação pequena. O TR para este nível é de 1,83 anos e a P no decorrer de um ano é de 54,6% (MORAES, 2015). Já na última inundação ocorrida em 20 de outubro de 2016, o rio atingiu a cota topográfica de 24,56 m, ficando 12,26 m acima do nível de referência. O TR para este nível é de 4,20 anos e a P no

³ De acordo com Moraes et al. (2013) a magnitude das inundações no município de Lajeado/RS é classificada como pequena entre os níveis de 19,00 m e 22,00 m; média entre os níveis 22,01 m e 25,00 m; grande de 25,01 m até 28,00 m; e como extrema quando os níveis ultrapassam os 28 m.

decorrer de um ano é de 23,81% (MORAES, 2015). Assim, como comenta Moraes (2015), percebe-se que o TR e a P dos eventos de menor magnitude são, respectivamente, menores e mais elevados do que os eventos de maior magnitude. A autora ressalta ainda, que em média, o município de Lajeado, é atingido por uma inundação a cada ano.

Gráfico 1 – Série histórica de inundações em Lajeado/RS, conforme nível fluvial medido na Estação Fluviométrica do Porto de Estrela



Fonte: Da autora, adaptado de MORAES (2015) e NIH (2017).

Estes eventos de inundações que atingem os municípios do Vale do Taquari, destacando-se o de Lajeado, resultam em danos sociais, ambientais e econômicos, demonstrando o quanto são vulneráveis e o quão importante são os investimentos em medidas para diminuir os impactos. Como exemplo, podem-se citar as inundações ocorridas em julho e outubro de 2001, que resultaram em prejuízos diretos à Lajeado, na ordem de 592 mil reais (NIH, 2017). Já, a inundação de julho de 2011 afetou 83.643 (27%) das pessoas residentes no Vale do Taquari, sendo que somente em Lajeado 39.216 habitantes foram afetados. O prejuízo econômico deste evento, ao nível de Vale, chegou a um montante superior a 45 milhões de reais (ECKHARDT et al., 2013).

3.4 Hidrometria e aquisição de dados hidrológicos

De acordo com Rodrigues e Mendingo (2013) a precipitação é o componente que apresenta maior controle sobre o ciclo hidrológico de uma região. Sendo importante ressaltar para este estudo, que a chuva ao atingir a superfície terrestre pode direta ou indiretamente alcançar os corpos hídricos, muitas vezes, resultando em cheias. O monitoramento conjunto da precipitação e do escoamento destes recursos hídricos é uma ferramenta importante para viabilizar estudos de zoneamento, previsão de alerta de enchentes e remoção de comunidades que vivem em áreas ribeirinhas.

O registro das precipitações pode ser realizado por pluviômetros manuais ou automáticos, radares meteorológicos ou sensores instalados em satélites. De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) os pluviômetros podem ser definidos como equipamentos, cônicos ou cilíndricos, projetados em dimensões padronizadas para coletar a água da chuva, instalados a 1,5 metros do solo e distantes de obstáculos como casas e árvores. Se o pluviômetro for manual, a altura pluviométrica acumulada será transferida a uma proveta graduada, para medição, e contabilizada em uma caderneta por um observador. A leitura, normalmente, é realizada no início da manhã, em horário fixo, por volta das 7 ou 8 horas.

Já, para a aferição automática da precipitação existe uma variedade de aparelhos, sendo o mais utilizado, atualmente, o de cubas basculantes. Neste equipamento, a água recolhida é encaminhada para duas cubas conjugadas por um eixo central, sendo que, enquanto uma é preenchida, a outra, esvazia. Cada movimento das cubas basculantes corresponde a uma lâmina de água precipitada, que é automaticamente registrada em uma memória e pode ser transmitida por telemetria para uma central de operação. Este tipo de equipamento permite a aferição da chuva em intervalos menores, inclusive de minutos (GARCEZ; ALVAREZ, 2006; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A precipitação por radar e satélite ainda é pouco utilizada no Brasil, apesar do número de equipamentos instalados e/ou em órbita estar aumentando. As estimativas de chuva para algumas regiões brasileiras são disponibilizadas por institutos como o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e a Rede de Meteorologia (REDEMET). O radar é um equipamento, que por meio de sua antena rotativa emite pulsos de energia eletromagnética em intervalos de tempo regulares. Ao interceptar as partículas de chuva, parte da energia é refletida em direção ao radar, e captada por um receptor. A partir da energia refletida e do tempo

decorrido entre a emissão e receptação, é possível estimar a taxa de precipitação e a distância do alvo (QUEIROZ, 2009; SILVA, 2015). Se comparadas aos pluviômetros, as estimativas do radar apresentam erros relevantes. Mas, por outro lado, o radar tem como vantagem a estimativa de chuva para uma extensa área (raio abrangido pelo radar), em quilômetros, e em tempo praticamente real (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Os satélites meteorológicos, por sua vez, são equipamentos que orbitam o planeta Terra e são constituídos por sensores capazes de registrar a radiação refletida ou emitida pela superfície e atmosfera terrestre em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Os satélites podem ser do tipo geoestacionário ou de órbitas polares, sendo que os primeiros, localizados a cerca de 36.000 km de altitude, orbitam a Terra sobre a linha do Equador, observando sempre o mesmo ponto do Planeta, mantendo a mesma velocidade angular de rotação da Terra. Já, os de órbita polar estão situados entre 200 e 1.000 km de altitude, e cobrem todo o Planeta, orbitando-o de norte a sul. Além disso, os sensores orbitais podem ser passivos ou ativos, de acordo com a fonte de energia empregada para imagear os alvos. Os sensores meteorológicos ativos possuem sua própria fonte de energia eletromagnética, tal como as micro-ondas do radar. Já os sensores passivos não possuem fonte própria de radiação, utilizando-se da radiação solar (visível e infravermelho próximo) ou terrestre (infravermelho termal), refletida ou emitida pelos alvos (CONTI, 2002; COLLISCHONN, 2006; MOREIRA, 2007).

Na faixa do visível a precipitação é estimada com base no brilho (reflectância) do topo das nuvens, que indica a sua espessura, e consequentemente seu potencial de chuva. Na faixa do infravermelho, a estimativa de chuva baseia-se na temperatura de brilho do topo das nuvens, que tem estreita relação com a sua altura, espessura e possibilidade de chuva (JIMÉNEZ, 2011). Contudo, como apontam Collischonn et al. (2007) nem toda nuvem brilhante e com topo frio está efetivamente produzindo chuva. Por isso, os satélites dotados de radar são melhores para mensurar a quantidade de água nas nuvens (NASCIMENTO, 2016). Os dados coletados pelo satélite são convertidos em sinais elétricos e transmitidos para estações de processamento terrestre, que os transformam em imagens (MOREIRA, 2007).

Como principal vantagem dos sensores orbitais pode-se citar a grande abrangência espacial, capaz de cobrir toda a superfície terrestre, incluído áreas habitáveis e as de difícil acesso como os oceanos e os desertos, diferente do que ocorre com os pluviômetros e os radares terrestres, que tem distribuição e abrangência esparsa e irregular. Além disso, os satélites

meteorológicos apresentam um tempo de revisita satisfatório, com disponibilidade de imagens em curto intervalo de tempo. O satélite GOES, por exemplo, apresenta imagens a cada 30 minutos (FLORENZANO, 2002; NASCIMENTO, 2016). Nascimento (2016) comenta ainda, que o amplo banco de dados históricos dos satélites meteorológicos também permite realizar estudos sobre as variações dos elementos e fenômenos climáticos em escalas global ou regional. Como desvantagens destes equipamentos, podem-se citar a necessidade de manutenção e calibração, tal como também acontece com os pluviômetros e radares; e a necessidade de validação da estimativa de chuvas com base nos registros de pluviômetros, uma vez que os sensores orbitais apresentam limitações quanto a este parâmetro.

Com relação ao escoamento superficial, Garcez e Alvarez (2006) comentam que, existem diversas grandezas características que afetam o gerenciamento dos corpos hídricos, sendo que para este estudo serão detalhadas somente o nível d'água, a vazão e a velocidade de escoamento:

- I) nível d'água: consiste na altura atingida pela água na seção do corpo hídrico, levando-se em consideração uma referência. Os valores podem se referir a medidas instantâneas ou à média de algum período. A unidade de medida comumente utilizada é o metro (m);
- II) velocidade média: refere-se à relação entre o espaço percorrido e o tempo decorrido, no deslocamento da água. Normalmente é aferida em m/s;
- III) vazão: refere-se à relação entre o volume de água que escoar em um determinado intervalo de tempo. Pode-se também determiná-la pela multiplicação entre a velocidade média e a área “molhada” da seção do corpo hídrico. Assim, como o nível d'água, os valores de vazão também podem ser instantâneos ou médios de um período. A unidade de medida normalmente utilizada é o m³/s.

Os equipamentos empregados para medição das cotas, em escala métrica, são o linímetro ou o linígrafo. O linímetro nada mais é do que uma régua vertical instalada num corpo d'água, com base num *datum* de referência, para a observação regular da oscilação de nível. A régua de metal ou de madeira é instalada em um trecho reto do rio, em que a velocidade do fluxo seja mais estável, tanto em estiagem como em cheia, bem como num ponto onde a parte inferior fique dentro da água, sob qualquer condição do tempo. As leituras são realizadas e

anotadas em uma caderneta, pelo menos duas vezes ao dia (início da manhã e final da tarde), em horário fixo, por um observador (TUCCI, 2013; SILVA, 2015).

Já, o linígrafo consiste num medidor automático associado à régua, que faz a leitura do nível d'água em intervalos de tempo menores por meio de diferentes tecnologias como sensores de pressão, sensores eletrônicos, com boias flutuantes, e ainda, ultrassônicos (TUCCI, 2013). Os linígrafos de boia, por exemplo, são instalados num poço vertical na margem do rio, que se liga ao corpo hídrico por um cano. À medida que o nível do rio se eleva, a água no poço também sobe, modificando a posição da boia, que está conectada por um cabo a um contrapeso. Esse cabo, ao se movimentar, aciona o registrador automático de nível. Os sensores ultrassônicos, por sua vez, são instalados fora da água sobre a superfície do corpo hídrico, em uma posição fixa e superior a cota máxima atingida pelo rio, como por exemplo, uma ponte. Estes sensores emitem pulsos de ultrassom, os quais são refletidos pela água na forma de eco. Este sinal é captado pelo sensor, que a partir do tempo decorrido entre a emissão do pulso e recepção do eco, consegue estimar a que distância está a superfície da água (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Os dados coletados pelos diferentes linígrafos são armazenados em uma memória e podem ser periodicamente recolhidos por uma equipe, ou ser transmitidos em tempo real para uma central de operação com o uso de tecnologias de telemetria (satélite, telefonia celular e rádio) (SILVA; CALHEIROS, 2014).

Para determinar a vazão de cursos hídricos naturais também existem diferentes técnicas como a medição de vazão por capacidade, por diluição de um traçador, por dispositivos hidráulicos e por medição das velocidades do fluxo de água, sendo o último o mais empregado (TUCCI, 2013). A velocidade, igualmente, pode ser aferida por diferentes equipamentos como os molinetes fluviométricos e pelo perfilador acústico Doppler.

O molinete é um equipamento dotado de pequenas hélices, perpendiculares ao fluxo de escoamento, que giram pela passagem da água. Estes estão acoplados a um sistema de contagem das rotações, que são convertidas em velocidade do fluxo por meio de uma equação aferida para o equipamento. Como a velocidade não é igual em toda a seção transversal de um rio é necessário realizar a medição em diferentes verticais e profundidades, sendo ao final obtida a velocidade média em cada vertical. Por isso, os molinetes, também são dotados de régua para aferir a profundidade em que está sendo realizada a medida (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; SILVA; CALHEIROS, 2014). Segundo Tucci (2013), ao conhecer a velocidade média

da água em várias verticais da seção, bem como a área referente a cada vertical, é possível obter a vazão total do rio pelo somatório do produto destas duas variáveis.

O perfilador acústico de correntes Doppler (ADCP), de acordo com Sene (2010), Collischonn e Dornelles (2013) e Silva (2015), é um sensor que emite ondas de ultrassom (pulsos acústicos) em uma frequência conhecida, que percorrem a coluna d'água e interagem com as partículas suspensas, sendo refletidas de volta ao sensor. A diferença de frequência entre a onda emitida e refletida é proporcional à velocidade das partículas imersas na água. Os dados de velocidade coletados são transmitidos diretamente a um computador, e automaticamente, já são calculados os valores de vazão. Estes equipamentos ficam acoplados a embarcações, com ou sem tripulação, que percorrem a seção do corpo hídrico, de uma margem à outra, enquanto as medições são realizadas.

Como visto, a determinação da vazão é um processo que envolve uma série de equipamentos e profissionais, que resultam em custos elevados, sendo por isso realizada com menor frequência (normalmente, no máximo uma leitura mensal). Logo, para se obter uma série contínua de dados de vazão a técnica mais utilizada se refere à adoção de uma curva-chave, que relaciona os níveis fluviais medidos pelos linígrafos às leituras de vazão realizadas na mesma seção fluvial. Para tanto, são realizadas algumas campanhas de medição de vazão num local onde haja um linímetro ou linígrafo, considerando períodos de seca, normalidade e de cheias. Tendo os dados de nível e vazão deste ponto, é possível estabelecer uma relação entre ambas variáveis, a curva-chave. Com esta ferramenta é possível transformar automaticamente o nível de água em vazão, diminuindo-se, significativamente, os custos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; SILVA; CALHEIROS, 2014).

Tucci (2013) e Silva (2015) destacam que a coleta de dados pluviométricos e fluviométricos podem apresentar inconsistências, em virtude de problemas com os equipamentos ou com o próprio observador. Por isso, antes da utilização dos dados é fundamental que os mesmos sejam analisados e consistidos.

Atualmente, existem no Brasil institutos como a Agência Nacional de Águas (ANA), o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que têm uma rede de pluviômetros, manuais e automáticos, espalhada pelo território nacional. A ANA, o CEMADEN e a CPRM contam ainda com uma rede de dados de nível d'água, vazão,

dentre outros, dos postos distribuídos no território nacional, que podem ser acessados conforme detalhado a seguir.

- A ANA através do portal HidroWeb⁴ disponibiliza o banco de dados das cerca de 15.620 estações pluviométricas e 9.920 estações fluviométricas cadastradas junto ao órgão (ANA, 2017), possibilitando o acesso a dados variados como precipitação, nível, vazão, sedimentos, qualidade da água, bem como informações acerca de rios, bacias e sub-bacias brasileiras. Embora haja uma grande quantidade de equipamentos espalhados pelo país, a distribuição é irregular, havendo vastas áreas sem coleta de dados, da mesma forma que muitas das estações apresentam falhas na sua série de dados ou estão inoperantes;
- O INMET também possui centenas de estações meteorológicas, manuais e automáticas, no Brasil. Os diferentes dados coletados, como precipitação, temperatura, umidade, direção e velocidade dos ventos, dentre outros, pelas estações automáticas⁵ podem ser consultados diretamente no *site*, se forem referentes aos últimos 365 dias, ou através do contato, via e-mail, se o período for anterior. Já, os dados das estações meteorológicas convencionais⁶ também podem ser acessados diretamente no *site*, se forem referentes aos últimos 90 dias, ou a partir do cadastro no Banco Meteorológico para Ensino e Pesquisa (BDMEP)⁷, se o período for anterior. Apesar de também haver uma grande quantidade de estações, algumas operando desde o começo do século XX (INMET, 2017), elas também não apresentam uma densidade de distribuição espacial satisfatória, bem como apresentam descontinuidade na coleta de dados ou estão inativas;
- O CEMADEN criado em 2011, monitora, 24 h por dia, 888 municípios brasileiros, sendo que conta com 960 pluviômetros semiautomáticos, 2.267 automáticos e 115 estações hidrológicas (CEMADEN, 2017). Os dados dos pluviômetros podem ser obtidos através da página virtual do Centro⁸;

⁴ <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>

⁵ <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

⁶ <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>

⁷ <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>

⁸ <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>

- A CPRM monitora, atualmente, 11 bacias hidrográficas brasileiras, integrantes do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), incluindo a do Taquari-Antas, e conta para isso, com o aporte de estações meteorológicas e fluviométricas (CPRM, 2017). Os dados diários estão disponíveis no banco de dados do HidroWeb, enquanto que os dados horários históricos destes equipamentos podem ser acessados por intermédio do contato com a Companhia.

Como visto existe uma ampla gama de equipamentos pluviométricos e fluviométricos espalhados pelo Brasil para aquisição de dados, sendo que todos os órgãos citados anteriormente têm instrumentos instalados na bacia Taquari-Antas, em que o município de Lajeado está inserido. Apesar da grande quantidade de equipamentos, Kurek (2016), ao avaliar diferentes fontes de dados, constatou que existem muitos períodos falhos nas diferentes estações, os dados hidrológicos não estão baseados num mesmo nível de referência, da mesma forma que, tanto os dados pluviométricos como fluviométricos apresentam séries temporais e intervalos de coleta diferentes, o que acaba dificultando e tornando mais trabalhosos os estudos relacionados a esta área. Além disso, considerando as estações em funcionamento e cadastradas junto à ANA, a autora supracitada verificou que há uma má distribuição ao longo da bacia, havendo pontos com uma ampla densidade, e outros, com escassez de equipamentos. Ela destaca que a pior distribuição espacial das estações fluviométricas e pluviométricas ocorre na planície fluvial, justamente onde a área deste estudo está inserida, o que dificulta a aplicação de medidas estruturais e não estruturais, recorrendo-se, normalmente, a técnicas de interpolação para suprir esta carência.

3.5 Sistemas de monitoramento e alerta a inundações

Com o intuito de reduzir os danos e prejuízos causados pelas cheias, podem-se empregar duas tipologias de medidas, as estruturais e não estruturais, de forma combinada ou separada, sendo que ambas, visam apenas diminuir as consequências deste evento extremo e não são capazes de controlar as inundações na sua totalidade (TUCCI, 2013).

As medidas estruturais consistem em obras de engenharia e podem ser divididas em extensivas e intensivas. As primeiras condizem àquelas aplicadas ao nível de bacia para alterar a relação entre a chuva e a vazão, tal como a modificação da cobertura vegetal, que minimiza e

retarda os picos de cheia, da mesma forma que controla os processos erosivos. As medidas intensivas, por sua vez, são aplicadas nos rios para acelerar, retardar ou desviar o escoamento, sendo, representadas, respectivamente, pela construção de diques, reservatórios e canais de desvio (TUCCI, 2006). O autor destaca que a implantação destas estruturas é complexa e apresenta custos elevados.

Já, as medidas não estruturais são as que visam reduzir os danos das inundações e possibilitar a melhor convivência com a população, por intermédio da implantação de normas, regimentos e programas, tais como os sistemas de previsão e alerta de inundações. Esta tipologia de medida é eficaz com custos menores de implantação e com horizontes de atuação mais amplos (CANHOLI, 2005).

Os sistemas de previsão e alerta de inundações funcionam com o objetivo de monitorar as condições hidrometeorológicas de uma bacia de interesse, a fim de detectar possíveis cenários de emergência e emitir alertas em tempo hábil, para que as autoridades competentes, bem como a população possam tomar as devidas providências, de modo que os prejuízos e impactos das inundações sejam minimizados (MOREIRA, 2016). Santos (2007) destaca ainda que os sistemas de previsão e alerta evitam o fator surpresa na população, o que facilita as ações preventivas da Defesa Civil para isolar e retirar as pessoas e os respectivos bens das áreas de risco.

Estes sistemas, de acordo com Tucci e Bertoni (2003) e Kobiyama et al. (2006), apresentam como componentes principais, o monitoramento e a aquisição de dados em tempo real; a transmissão destes dados para um centro de análise; a modelagem e simulação de níveis ou vazões futuras com modelo matemático; a orientação das instituições responsáveis, como a Defesa Civil, e alerta da população que vive em áreas sujeitas às inundações.

Sene (2008) destaca que os modelos de previsão são importantes componentes dos sistemas de alerta, pois auxiliam no aumento do horizonte de previsão de eventos de inundação, indicam a sua provável magnitude, e contribuem na compreensão da complexidade de seu desenvolvimento. Além disso, são ferramentas fundamentais para a tomada de decisões para emissão de alertas e de ações para diminuir os impactos destes eventos. Os modelos se baseiam, normalmente, nos dados de precipitação ocorrida na bacia de drenagem e dos níveis dos rios a montante, e/ou ainda, das estimativas de precipitação, provenientes de modelos atmosféricos. Em virtude da maioria dos dados de precipitação e cotas serem utilizados em tempo

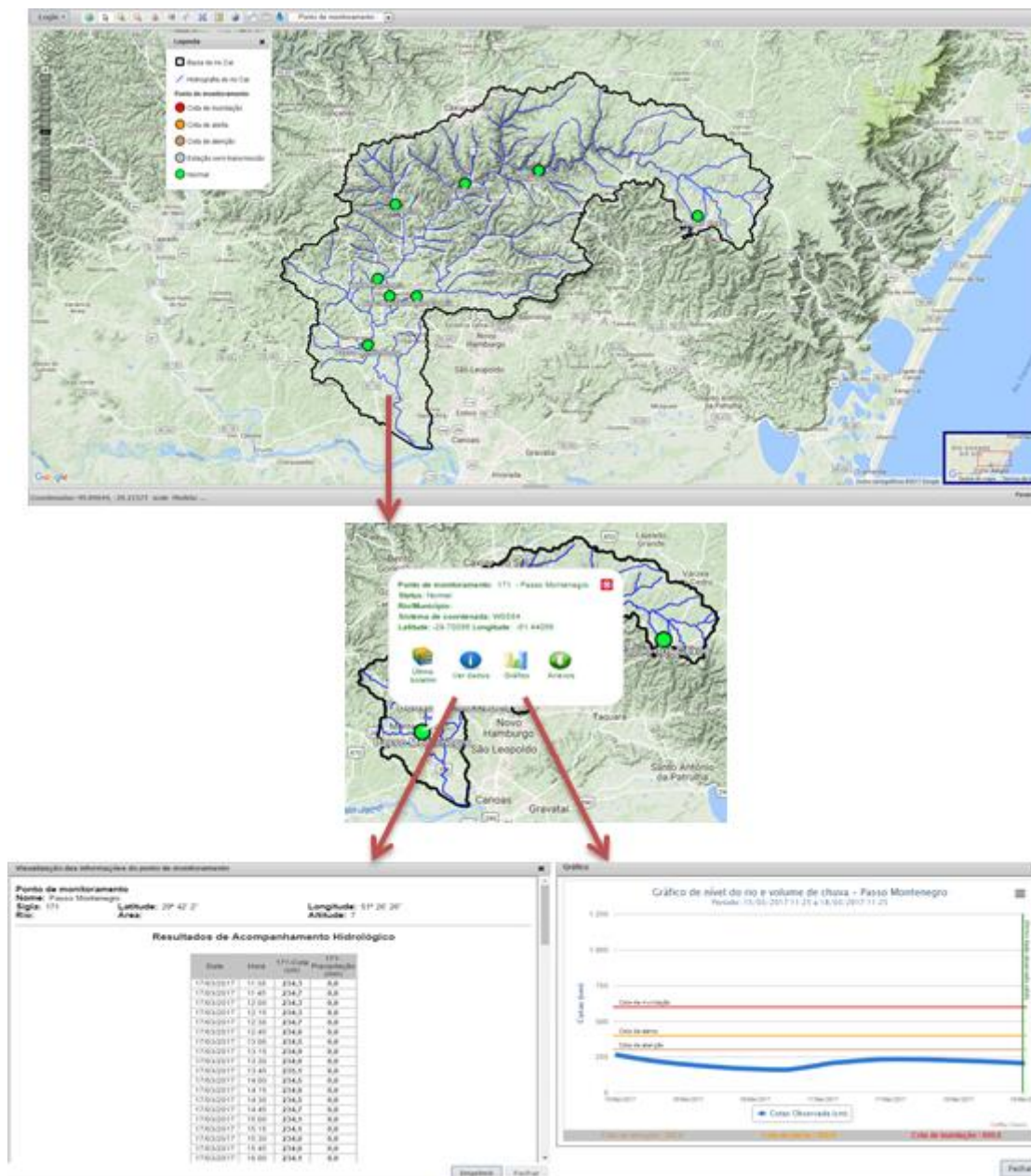
praticamente real, é importante que haja um sistema de monitoramento telemétrico destas variáveis, em vários pontos da bacia, além de uma central de operação para recepção e processamento destes dados (SENE, 2008; SIQUEIRA, 2015).

Como visto no Subcapítulo 3.4, embora haja carências na distribuição de estações pluviométricas e fluviométricas, ao longo do território brasileiro, inclusive, na área deste estudo, o aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de previsão e alerta de inundações ameniza os danos decorrentes deste evento extremo, da mesma forma que facilita a convivência da população, visto que a maioria das cheias não pode ser controlada (OLIVEIRA, 2010).

Pelo fato das cheias serem recorrentes no Brasil, no estado do Rio Grande de Sul e no Vale do Taquari, sistemas de monitoramento e alerta estão em fase de planejamento ou operação para contribuir na redução das consequências das inundações, bem como de outros desastres naturais. A nível federal pode-se citar o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) que é gerenciado pela CPRM. Este sistema conta com pluviômetros automáticos e linígrafos distribuídos em 11 bacias brasileiras (Rios Amazonas, Paraguai, Doce, Caí, Muriaé, Acre, Madeira, Parnaíba, Taquari-Antas, Branco e Xingu), sendo importante salientar, que nos quatro últimos rios, as estações de monitoramento e a previsão de níveis estão em fase de testes. O SACE é um sistema computacional que coleta, armazena, analisa e divulga os dados das estações de forma automática. Os dados coletados pelos pluviômetros e linígrafos são disponibilizados de forma tabular e gráfica na plataforma WebGIS⁹ do site da CPRM. Esta plataforma permite que o usuário navegue pela bacia, acesse aos dados pluviométricos e fluviométricos reais de cada uma das estações, bem como acompanhe em tempo real a evolução de eventos de cheia disponibilizada na forma gráfica, conforme pode ser observado na Figura 4. Nesta plataforma também é possível acessar os boletins de monitoramento dos corpos hídricos com as previsões de eventos hidrológicos críticos a uma antecedência de semanas, dias ou horas, dependendo das características de cada bacia. A CPRM também envia estes boletins ao CEMADEM, ANA, Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) e às Defesas Cíveis, estadual e municipal, para que as devidas providências sejam tomadas e os prejuízos decorrentes das inundações sejam minimizados (CPRM, 2017).

⁹ O WebGIS consiste num sistema para disponibilização e construção cartográfica utilizando a interface da internet. Uma de suas principais vantagens se refere à interação entre o usuário e o servidor (computador), sendo que o último contém um banco de dados com diversos tipos de informação, que podem ser apresentadas no mapa de acordo com a escolha do usuário com acesso à internet (SANTANA, 2009; SOBRINHO; SILVA, 2012).

Figura 4 – Representação do SACE do rio Caí



Fonte: Da autora, adaptado de CPRM (2017).

Já em nível estadual está sendo criado o Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres (SMAD), que tem o intuito principal de monitorar e alertar à Defesa Civil e aos órgãos competentes da gestão de riscos, sobre os eventos críticos que se desencadeiam no estado, sobretudo aqueles de origem climática e meteorológica, tais como as inundações e estiagens. Até o momento, já foi criada uma sala de situação, que monitora os recursos hídricos gaúchos com base na rede estadual de estações pluviométricas e fluviométricas instalada, sendo algumas de responsabilidade da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA) e outras de

responsabilidade de instituições parceiras da SEMA. Os futuros produtos deste monitoramento consistem em boletins da situação dos principais rios e bacias hidrográficas do estado, incluindo informações de níveis de alerta de inundações; previsão de precipitação; e dados de precipitação e nível dos rios, em escala horária, das estações monitoradas (SMAD, 2017).

No Vale do Taquari já esteve em operação, entre os anos de 2001 e 2007, um Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAÉ), coordenado pelo Centro Universitário Univates e que incluía o município de Lajeado, sendo que a previsão de nível era estimada por um modelo matemático do tipo cota-cota. Atualmente, conforme também comenta Kurek (2016), há a união de esforços por diferentes Instituições de Ensino e do Governo para retomar as atividades de previsão de níveis no Vale do Taquari. Para tanto, foram instalados pela Univates e a CPRM vários pluviômetros e linígrafos ao longo da bacia Taquari-Antas para monitorar estes dados, bem como, utilizá-los para a previsão de níveis. Diante deste contexto, o presente estudo também visa contribuir para a estimativa de cotas no município de Lajeado, baseando-se em diferentes abordagens.

3.6 Modelos para previsão de inundações

A concepção dos sistemas de previsão e alerta está fundamentada, principalmente, no emprego de modelos hidrológicos, que possibilitam a simulação do percurso da água na natureza, auxiliando na previsão antecipada dos eventos de inundação. Esta técnica facilita a tomada de decisão e as atividades de remoção dos moradores e seus pertences das áreas de risco, diminuindo os impactos (SENE, 2010; REIS; PONS; LOPES, 2016).

Um modelo, segundo Christofletti (2002), pode ser genericamente definido como uma representação simplificada da realidade, de modo que se possa reconstruí-la, prever seu comportamento e a sua evolução. De acordo com Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma ferramenta que permite o melhor entendimento e representação dos processos que ocorrem em uma bacia, além de possibilitar a previsão de condições diferentes das observadas. O autor comenta ainda que um modelo é a representação de um sistema, que com base em uma entrada, apresenta respostas, por meio de uma saída. A exemplo da bacia hidrográfica, o sistema é acionado pela entrada de precipitação, que por meio de diversos processos, é transformada em vazão e provoca o aumento dos níveis fluviais.

Os modelos podem ser do tipo físico, analógico ou matemático. Na primeira tipologia, o sistema é representado por meio de um protótipo em escala menor, tendo como referência a semelhança geométrica, dinâmica e cinemática entre o sistema e o protótipo. Já os de natureza analógica utilizam a analogia entre as equações que regem os diferentes fenômenos para modelar o processo desejado no sistema mais conveniente. Por exemplo, a analogia entre as equações do sistema hidráulico e um circuito elétrico, permite que o primeiro seja representado pelo segundo, que apresenta menor custo. E, por fim, os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas e argumentos lógicos. Eles são também conhecidos como digitais, já que comumente, é desenvolvido um programa computacional para a realização dos cálculos do modelo desejado (TUCCI, 2005; MELO, 2010). Pela facilidade de modificar a sua lógica, obtendo-se diferentes resultados em um mesmo sistema, e a rápida velocidade de respostas, estes são os mais utilizados para a modelagem e simulação hidrológica (TUCCI, 2005; SILVA, 2006).

De acordo com Tucci (2005) os modelos hidrológicos podem ser classificados com base em diversos critérios: o tipo de variáveis empregadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relação existente entre as variáveis (empíricos ou conceituais); a forma como os dados são representados (discretos ou contínuos); e a concentração espacial (concentrados ou distribuídos).

Os modelos estocásticos são definidos por Dooge (1973) e Tucci (2005), como aqueles em que pelos menos uma das variáveis envolvidas apresenta comportamento aleatório. Ou seja, os dados de entrada e de saída do modelo têm relacionamento estatístico, sendo que as respostas são probabilísticas dentro de um intervalo de confiança. Moreira (2016) comenta que estes modelos são empregados para descrever séries temporais, que podem ser caracterizadas como fenômenos estatísticos que evoluem no decorrer do tempo, conforme as leis probabilísticas. Os modelos estocásticos apresentam a particularidade de que para o mesmo conjunto de dados de entrada, diferentes respostas do sistema podem ser obtidas, em função da variável aleatória que contribui no processo de modelagem. Esses modelos frequentemente são usados em hidrologia, climatologia e meteorologia, tendo em vista a aleatoriedade desses processos na natureza.

Já, os modelos determinísticos não utilizam os conceitos de probabilidade em seus resultados, apresentando valores exatos. Logo, pode-se dizer, que para uma mesma entrada, o modelo sempre produz uma mesma saída (TUCCI, 2005). Barbosa (2006) comenta que estes modelos objetivam representar o sistema físico natural, ou seja, os processos que compõem o

ciclo hidrológico, de modo que a partir de dados de entrada como chuva, cobertura vegetal, umidade do solo, dentre outros parâmetros, sejam fornecidas as séries de vazão.

Os modelos empíricos utilizam equações que não estão relacionadas com a natureza física dos fenômenos, de modo que os valores calculados são diretamente ajustados aos dados observados, buscando-se uma relação entre ambos (TUCCI, 2013). Silva (2006) menciona que a principal vantagem deste modelo é a facilidade de atualizar seus parâmetros em tempo real. Contudo, Reis (2014) aponta que eles são específicos para a região e para o período ao qual foram estimados e ajustados, além de serem sensíveis a alterações das condições que não estavam previstas no modelo, como, por exemplo, chuvas com elevada altura pluviométrica.

Um modelo conceitual, por sua vez, representa os processos físicos do fenômeno estudado, permitindo, teoricamente, a realização de extrapolações (DORNELLES, 2007; FILHO et al., 2012). Tucci (2005) explica que alguns autores utilizam uma subdivisão na classificação destes modelos, que podem ser semiconceituais e físicos. Os modelos semiconceituais são aqueles que apesar de ter relação com as características do processo, ainda apresentam empirismo nos parâmetros das equações empregadas. Já, os modelos físicos consideram as principais equações diferenciais dos processos físicos que compõem o ciclo hidrológico, a fim de representá-lo de forma simplificada. Estes modelos são os que mais se assemelham à natureza real do sistema, porém, apresentam algumas dificuldades, que condizem com a variabilidade espacial dos processos e à estimativa dos parâmetros.

O sistema é caracterizado como discreto quando as modificações de estado ocorrem em intervalos de tempo. Já, um sistema contínuo apresenta fenômenos contínuos no tempo (TUCCI, 2005). Para exemplificar, Filho et al. (2012) comentam que um modelo hidrológico discreto busca realizar a modelagem de intervalos isolados da série, a fim de representar os eventos de cheia ou recessão. Ao contrário destes, os modelos contínuos objetivam representar períodos longos da série, que muitas vezes contemplam períodos de comportamentos hidrológicos distintos, tendo, por isso, uma estrutura mais detalhada, capaz de representar as fases do ciclo hidrológico com maior precisão. Os autores ressaltam ainda que mesmo os modelos contínuos apresentam discretização temporal, devido aos fenômenos hidrológicos serem representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. Segundo Tucci (2005), a escolha do modelo depende da economia e precisão esperada, sendo que na maioria das vezes, tem-se um aumento no custo computacional quanto menor for o intervalo de tempo, visto que a precisão dos resultados será maior.

O modelo é dito concentrado quando não é considerada a variabilidade espacial das variáveis de entrada, considerando-se que as características da bacia são uniformes e que as variáveis apresentam valores médios, a exemplo da precipitação em uma bacia. Geralmente, estes modelos empregam somente o tempo como uma variável independente (TUCCI, 2005; MATOS, 2012). Quando as variáveis e parâmetros de entrada oscilam ao longo do espaço e/ou do tempo, o modelo é classificado como distribuído. Logo, estes modelos permitem que haja a discretização de toda área em elementos regulares ou irregulares, de acordo com seus aspectos de homogeneidade, como sub-bacias ou células quadradas, sendo que cada uma pode apresentar resultados diferentes, que são integrados numa simulação final. Por intermédio dos modelos discretos, a precipitação, por exemplo, pode ser espacializada, o que torna a simulação mais coerente com a realidade. Contudo, é necessária uma quantidade maior de informações acerca da bacia hidrográfica. Da mesma forma que, o maior detalhamento dos processos, principalmente nos modelos distribuídos por células, pode dificultar o seu entendimento e o ajuste dos parâmetros por parte do usuário (SALAS, 2000; TUCCI, 2005; BARBOSA, 2006; MELLER, 2012).

Tucci (2005) e Silva (2011) destacam que em virtude da complexidade da natureza física dos processos envolvidos no ciclo hidrológico, os modelos, independente de qual combinação de critérios for empregada, apresentam limitações, que não permitem representar o sistema na sua totalidade, e, sim, somente de forma simplificada. As principais limitações condizem com a quantidade e qualidade dos dados de entrada e a dificuldade de representar alguns processos de forma matemática. Apesar disso, as simplificações realizadas não devem invalidar o resultado final, que deve estar dentro do aceitável para o fim desejado. Diante deste contexto, surgiu um grande número de modelos, que apresentam diferenças na utilização de dados, dos objetivos a serem alcançados, dentre outros (TUCCI, 2005).

Para a previsão de cheias e inundações podem ser empregados modelos de propagação da vazão do escoamento, de chuva-vazão e do tipo cota-cota. Os primeiros realizam a propagação do escoamento nos cursos hídricos de uma bacia, considerando a devida atenuação decorrente do meio físico natural. Ou seja, com base na vazão de montante da bacia de drenagem, é possível prever a vazão numa seção de interesse a jusante (SILVA, 2006).

Fan, Pontes e Paiva (2014) comentam que o movimento da água pode ser definido de forma matemática considerando uma, duas ou três dimensões espaciais. Contudo, como o escoamento superficial em rios apresenta escoamento predominante longitudinal, os processos

a serem modelados podem ser bem representados por equações de uma dimensão espacial, que desprezam as variações de velocidade nas direções vertical e transversal. Em virtude disso, geralmente, o processo de propagação de vazões em corpos hídricos é representado pela utilização conjunta de duas equações, de continuidade e quantidade de movimento do escoamento, conhecidas como equações de Saint Venant. A primeira equação considera a conservação da massa ou do volume entre duas seções do rio num dado intervalo de tempo, já a segunda, considera as principais forças envolvidas no escoamento, tal como o atrito, a pressão, a inércia e a gravidade (TUCCI, 2005; VIDAL, 2012; FAN; PONTES; PAIVA, 2014).

Segundo Chow (1959) os modelos de escoamento podem ser classificados em hidrológicos e hidráulicos. Os primeiros desprezam a formulação dos efeitos da quantidade de movimento, levando em consideração somente a equação da continuidade e uma função simplificada que relaciona a vazão e o armazenamento de água em um trecho de rio (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Tucci (2013) comenta que estes modelos são amplamente empregados, em virtude da simplicidade de formulação e ao pequeno número de dados necessários. Já, os modelos hidráulicos são os que utilizam as equações de Saint Venant na íntegra ou com pequenas simplificações, necessitando, portanto, de uma maior quantidade de dados, que tornam os cálculos mais complexos, mas, por outro lado, permitem a melhor representação física do escoamento (CHOW, 1959; TUCCI, 2013).

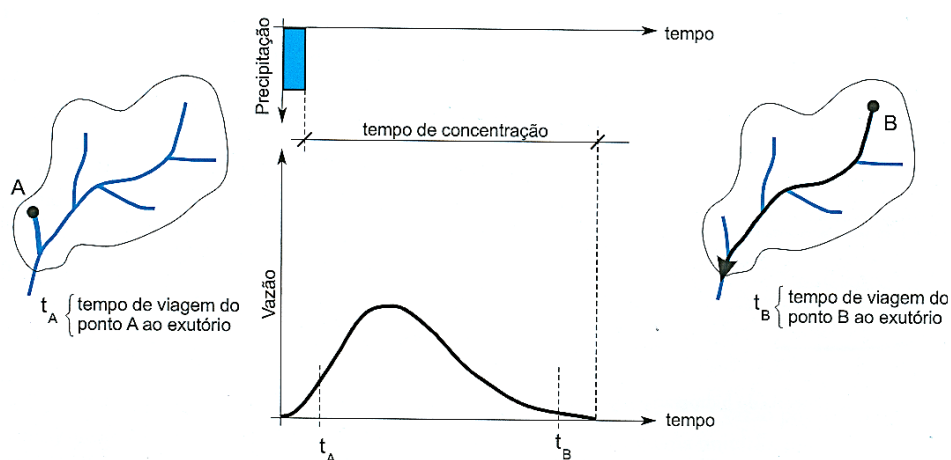
Atualmente existem diversos tipos de modelos de escoamento superficial, podendo-se destacar o Muskingum, Muskingum-Cunge, Clark e Nash, sendo que o segundo é um dos mais utilizados para a propagação de vazão em rios (TUCCI, 2005).

Os modelos de chuva-vazão, conforme Gontijo (2007), fazem uma simulação do ciclo hidrológico, sendo que a partir da precipitação que ocorre sobre uma bacia, o modelo permite projetar a vazão no seu exutório. Esses modelos devem integrar os diferentes algoritmos dos processos que ocorrem na trajetória da água, como a distribuição espacial da chuva, as perdas por intermédio da interceptação, por armazenamento em depressões e por evaporação, o fluxo da água no solo por infiltração, percolação e armazenamento subterrâneo, o escoamento subsuperficial e superficial (TUCCI, 2005). Resumidamente, os modelos utilizam os dados de distribuição, duração e intensidade da precipitação e algumas características da bacia (morfometria, uso e ocupação do solo, dentre outros) e dão a vazão como resposta de todos os processos que ocorrem nesta bacia, sendo que, normalmente, quando da existência de dados

reais de vazão, estes são comparados com os simulados para verificar o ajuste dos parâmetros do modelo e a qualidade da modelagem (SILVA, 2006).

Silva (2006) complementa dizendo que os modelos de precipitação-vazão são empregados para simular o hidrograma¹⁰ do escoamento superficial correspondente às precipitações efetivas com diferentes durações e frequências. A partir do hidrograma obtido, os impactos sobre as vazões a jusante podem ser avaliados, tal como o risco de cheias. Segundo Silva (2015), a precipitação efetiva é aquela que resulta em escoamento superficial, desprezando-se o que evaporou, infiltrou ou ficou retido em depressões superficiais ou subterrâneas. Collischonn e Dornelles (2013) apontam que é ela a responsável pelo aumento das vazões num corpo hídrico durante ou após uma chuva. Mas, ressaltam que nem toda chuva efetiva ocorrida em uma bacia chega simultaneamente num rio, pois, dependendo dos locais em que o escoamento é gerado, é percorrido um caminho com velocidades e distâncias diferenciadas, sendo que a resposta da bacia depende de suas características físicas e do evento com a duração e a intensidade da chuva. Os autores destacam que precipitações de mesma intensidade e duração tendem a gerar respostas de vazão (hidrogramas) similares. Na Figura 5 é apresentado o hidrograma na foz de uma bacia, indicando o aumento da vazão logo após o início da chuva, em virtude da chegada da água dos pontos mais próximos do exutório. Na sequência, tem-se um pico de vazão e, ao final, a recessão do hidrograma, quando chega ao exutório a precipitação efetiva gerada no ponto mais distante. A partir do momento que o escoamento superficial cessa, a vazão é mantida pelo fluxo de água subterrânea.

Figura 5 – Resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva de curta duração



Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

¹⁰ Hidrograma: representa a variação da vazão no exutório de uma bacia como resposta à precipitação no tempo e no espaço (TUCCI; BRAGA, 2003).

Tucci (2005) comenta que existe uma grande quantidade de modelos de chuva-vazão, alguns com estruturas mais simples e outros mais complexos, podendo-se destacar o Stanford IV, IPH ao IPH IV, SCS e o TOPMODEL, sendo o penúltimo, *Soil Conservation Service* (SCS), o mais empregado para a simulação de hidrogramas de cheias de projeto para obras hidráulicas e para o estabelecimento de risco de inundação para determinado local. É importante destacar que os modelos de chuva-vazão podem ser acoplados aos de propagação de escoamento, como o SSARR, em que inicialmente o modelo faz a simulação do processo precipitação-vazão e na sequência modela a propagação da vazão (TUCCI, 2005).

E, por fim, os modelos matemáticos que relacionam os níveis fluviais (do tipo cota-cota) consideram a correlação entre o nível do rio atingido a montante e no ponto de interesse. Tucci e Braga (2003) comentam que estes modelos são normalmente empregados em bacias maiores, pois, devido ao seu tempo de concentração¹¹ ser maior, é possível definir as cotas num ponto a jusante com boa antecedência. Esses modelos ainda possuem como vantagem, menores erros de previsão se comparados aos anteriores, embora não permitam a extrapolação dos dados, nem transposição dos parâmetros para outra bacia. Sene (2008) e Kurek (2016) destacam ainda que a relação entre duas estações pode não ser linear em alguns intervalos. Ou seja, as correlações podem ser afetadas por entradas de vazão ao longo do percurso e pela perda de vazão por armazenamento em reservatórios e pontos de captação da vazão, da mesma forma que, a extensão e o movimento dos fenômenos meteorológicos que atuam sobre uma região interferem no comportamento da vazão. Por isso, é recomendado que sejam incluídos na correlação pontos de observação da precipitação e/ou níveis mais a montante nos cursos d'água afluentes a fim de agregar maior confiabilidade na previsão de níveis.

A antecedência de previsão de níveis pelos modelos do tipo cota-cota, depende da distância entre as estações fluviométricas, sendo que quanto maior a distância, maior a antecedência. Contudo, a precisão do modelo tende a diminuir à medida que a distância entre as estações aumenta (OLIVEIRA, 2010). Por isso, Oliveira (2010) destaca que é preciso conciliar a antecedência e a qualidade nos modelos, de modo que o emprego de medidas cabíveis seja possibilitado para a remoção da população ribeirinha.

¹¹ Tempo de concentração é o tempo decorrido para que uma gota de chuva precipitada no ponto mais distante da bacia alcance o exutório. Este tempo é dependente da distância total percorrida pela água e a que velocidade escoar. Por isso, o tempo de concentração é maior em bacias grandes e menor em bacias pequenas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Oliveira, Guasselli e Saldanha (2012) comentam que os principais dados para a realização da previsão matemática ou estatística de enchentes e inundações são a precipitação espacializada na bacia, a vazão e as cotas dos rios, sendo importante que no local de interesse da previsão também se tenha um conhecimento prévio da dinâmica hidrológica (série histórica de vazão ou de cotas, tempos de retorno, dentre outros). A precipitação utilizada como dado de entrada pode ser tanto aquela registrada nos postos pluviométricos como aquela prevista pelos modelos atmosféricos. Dornelles (2007) esclarece que o emprego da chuva prevista, na maioria das vezes, possibilita que a previsão de níveis tenha uma antecedência ainda maior, contudo, é preciso lembrar que as incertezas dos modelos de previsão de chuva são agregadas ao modelo de previsão de níveis, podendo-se não ter resultados de boa qualidade no final da modelagem. Oliveira, Guasselli e Saldanha (2012) destacam ainda que nos modelos de propagação de escoamento e de chuva-vazão, é necessário estabelecer uma relação confiável entre a cota e a vazão, pois, somente, a partir do nível atingido é que será possível delimitar as áreas que serão afetadas pelas cheias. Como os modelos cota-cota já consideram dados de nível, não é necessário realizar nenhuma estimativa, o que descarta os erros associados a este processo.

Para a previsão de inundações, os dados de entrada devem ainda compreender a defasagem temporal do tempo de concentração da bacia, pois, dependendo de suas características, os dados momentâneos não são suficientes para a simulação, sendo necessários, também, aqueles de um ou mais dias anteriores à projeção, tal como fizeram Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) em seu estudo. Como o rio Taquari-Antas é extenso (mais de 500 km de extensão) e a bacia possui uma grande área (mais de 26.000 km²), o tempo de concentração da bacia é superior a um dia, sendo importante considerar na previsão de níveis, a possibilidade de emprego de dados de precipitação e/ou nível antecedentes ao último intervalo de tempo a fim de aprimorar as previsões.

Segundo Tucci (2005) o horizonte de previsão dos níveis fluviais pode ser realizado em curto prazo com uma antecedência que varia de algumas horas até 14 dias, ou a longo prazo, em que a antecedência pode ser de até nove meses. A previsão a curto prazo ou também denominada de tempo-real “permite estabelecer o nível e seu tempo de ocorrência para a seção de um rio com antecedência que depende da previsão da precipitação e dos deslocamentos da cheia na bacia” (TUCCI, 2005, p. 35). Este tipo de previsão é o normalmente empregado em sistemas de alerta para avisar a população residente em áreas ribeirinhas. Tucci e Braga (2003) comentam ainda que os modelos de curto prazo podem apresentar previsão contínua ou eventual, sendo que na primeira classificação, a previsão é realizada no decorrer do tempo,

independentemente de quais são as condições hidrológicas. Já as previsões eventuais são realizadas em períodos específicos do regime hidrológico, como em épocas de estiagens ou de inundações. É importante ressaltar que, independente do modelo ser contínuo ou eventual, nas bacias em que a propagação da cheia é lenta, pode-se realizar a previsão de cota em escala diária. Já, naquelas em que a variação dos níveis é rápida, a exemplo do Rio Taquari, entre os trechos de Encantado e Lajeado, em que a diferença de pico entre as estações fluviométricas gira em torno de 4 horas (KUREK, 2016), a previsão de inundações diária não seria eficiente na emissão de alertas e diminuição dos impactos deste evento extremo, sendo, por isso, importante realizar a previsão de níveis em escala horária, apesar da pequena disponibilidade de uma série de dados nesta escala temporal.

Os modelos de longo prazo, por sua vez, quantificam as chances estatísticas de uma inundação ocorrer, mas, sem precisar o momento de sua ocorrência. Estes modelos se baseiam em níveis ocorridos no passado e permitem estabelecer níveis de inundação perante a determinação de alguns riscos (TUCCI, 2005).

Conforme visto, atualmente existe uma ampla gama de modelos hidrológicos para a previsão de níveis, e a escolha da abordagem depende da compreensão e definição dos objetivos do estudo, das características da bacia e do rio, da disponibilidade de dados e da familiaridade com o modelo (TUCCI, 2005). Como o presente estudo visa elaborar modelos de previsão de níveis fluviais empíricos de curto prazo para a cidade de Lajeado utilizando diferentes abordagens, são apresentados a seguir alguns estudos realizados em Lajeado e em outras cidades gaúchas.

Eckhardt (2008) realizou estudo para previsão de níveis na cidade de Lajeado/RS, considerando a série de dados de inundações, entre 1942 e 2007, deste ponto da bacia, bem como, de uma estação a montante, na cidade de Encantado/RS. O modelo do tipo cota-cota foi elaborado considerando a correlação entre os níveis de ambas estações com base no menor valor de Qui-Quadrado Reduzido. De acordo com o autor, a partir dos dados de cota em Encantado é possível prever a cota em Lajeado com uma antecedência média de 6 horas. O ajuste do modelo aos níveis reais teve resultados relativamente bons, sendo que o erro médio absoluto ficou em aproximadamente 1 m.

Oliveira (2010) fez estudo similar para a previsão de níveis em São Sebastião do Caí e Montenegro, considerando, respectivamente, os níveis a montante, nas cidades de Nova Palmira

e São Sebastião do Caí. A precisão do modelo cota-cota de São Sebastião do Caí, que considerou 77 pares de eventos de inundação, foi satisfatória, ficando o erro médio na casa dos 0,65 m. Já, o modelo de previsão para Montenegro, que considerou 82 pares de eventos, apresentou resultados melhores que o anterior, com erro médio de 0,25 m. A maior precisão do segundo modelo é atribuída, pelo autor, à menor distância entre as estações fluviométricas. Oliveira (2010) destaca ainda que a previsão de níveis em ambas as estações pode ser feita instantaneamente à leitura de nível a montante. A antecedência de previsão para São Sebastião do Caí é de cerca de 24 h, já, para Montenegro, entre 12 e 16 h.

Pedrollo e Pedrollo (2013) descrevem em seu estudo os modelos preliminares empregados no Sistema de Alerta de Cheias da bacia do rio Caí, implantado pela CPRM, também para prever os níveis em São Sebastião do Caí e Montenegro. Os modelos foram constituídos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) treinadas com base nos dados contínuos da série histórica de precipitações das estações convencionais, localizadas a montante das seções de interesse, bem como, com os dados históricos contínuos de níveis fluviais das estações à montante e na seção de interesse, considerando diferentes defasagens temporais. É importante destacar que os dados de níveis estavam disponíveis em dois horários, às 7 e às 17 horas, e os de precipitação acumulada, às 7 horas. Por isso, ao considerar o tempo atual (t) como sendo às 7 horas, tem-se como defasagens do dia anterior referente às 17h e 7h, respectivamente, 14 h e 24 h, sendo, portanto, o alcance da previsão para as 17 h, correspondente a 10 horas à frente. Mas, os autores comentam que as previsões podem ser realizadas para qualquer horário do dia, desde que seja respeitada a defasagem de tempo dos dados de entrada. Ambos os modelos desenvolvidos apresentaram resultados satisfatórios, ficando o erro médio absoluto em São Sebastião do Caí e em Montenegro, respectivamente, em 17,6 centímetros (cm) e 11,5 cm, sendo novamente mais precisos na segunda cidade. Embora os modelos apresentem um bom ajuste, os autores comentam que em eventos extremos, eles podem não apresentar a mesma capacidade de previsão (PEDROLLO; PEDROLLO, 2013).

Kurek (2016) elaborou um modelo de previsão de níveis para a cidade de Estrela/RS, a partir do método de regressão linear múltipla, testando a utilização de vários dados de entrada, como precipitação média acumulada na bacia; dados de cota em Encantado e Muçum com diferente defasagem temporal; e, picos de inundação das três estações fluviométricas, Encantado, Estrela e Muçum, totalizando 59 composições de modelos de regressão linear testadas. Os melhores resultados foram obtidos pelo modelo que empregou as cotas máximas das três referidas estações, havendo duas versões, uma baseada em todos os eventos de

inundação registrados nas três estações fluviométricas, entre 1980 e 2013, e outra, que desconsidera o evento de 25/09/1988, o qual foi diagnosticado como fonte de incerteza. Ao contrário do que a autora esperava, a precipitação média acumulada na bacia nos dias anteriores à inundação não apresentou grande influência na previsão de níveis em Estrela, muito provavelmente, por terem sido utilizados dados pluviométricos de estações distribuídas em toda a bacia Taquari-Antas, sendo que boa parte dos dados de precipitação já estavam implicitamente representados nas cotas de Muçum e Encantando. Desta forma, a autora recomenda que seja realizado um estudo que considere somente a precipitação que ocorreu na bacia complementar entre as estações fluviométricas de Encantado e Estrela.

O erro padrão do modelo que considerou todos os eventos de inundação ficou em 61,57 cm, já o do outro, em 52,97 cm. Ao aplicar estes modelos a dois eventos de inundação ocorridos em 2015, embora os resultados tenham sido bons em ambos os casos, a autora comenta que não foi possível identificar qual é o mais preciso, em virtude dos poucos eventos analisados, mas, recomenda a versão que exclui a fonte de incerteza, na escala horária. A antecedência de previsão de níveis em Estrela depende, dentre outras características, das condições de umidade do solo, sendo que em períodos úmidos o tempo de deslocamento do pico de cheia entre Encantado e Estrela diminui (KUREK, 2016).

Dornelles (2007) realizou estudo para previsão de níveis fluviais diária nas cidades de Quaraí (lado brasileiro) e Artigas (lado uruguaio), a partir de diferentes metodologias de análise: RNAs com dados de entrada contínuos de níveis fluviais do local de estudo em dois dias anteriores à previsão, e de previsão numérica da precipitação num horizonte de 1 a 5 dias; RNAs somente com dados contínuos de níveis; modelo de regressão multivariada com os mesmos dados de cota e previsão de chuva. Os resultados da amostra de verificação do primeiro modelo demonstram que a precisão na previsão de níveis diminui à medida que aumenta o horizonte de previsão (1 a 5 dias), sendo o erro médio quadrático, respectivamente, 0,255 m; 0,436 m; 0,546 m; 0,545 m; 0,637 m. No segundo e terceiro modelo, o erro médio quadrático apresentou comportamento similar ao primeiro. O autor verificou ainda que todos os modelos têm dificuldade de estimar os picos de cheia, provavelmente em virtude de haver pequena quantidade de dados de eventos extremos para a modelagem. Ao comparar os resultados obtidos pela aplicação de RNAs com e sem emprego da previsão de precipitação, apesar de não apresentar boa qualidade na previsão dos picos de cheia, verificou que ao empregá-la têm-se melhores resultados do que não os utilizando. Ao confrontar os resultados deste modelo com o de regressão, tem-se que o primeiro apresenta melhor ajuste para previsões acima de 3 dias.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A bacia Taquari-Antas situa-se na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul (FIGURA 6) e possui uma área de 26.428,00 km², que integra total ou parcialmente, 119 municípios. A população estimada da bacia é de 1.207.640 habitantes, que corresponde a 12,55 % da população total do estado (FEPAM, 2001; FEPAM, 2017; SEMA, 2017).

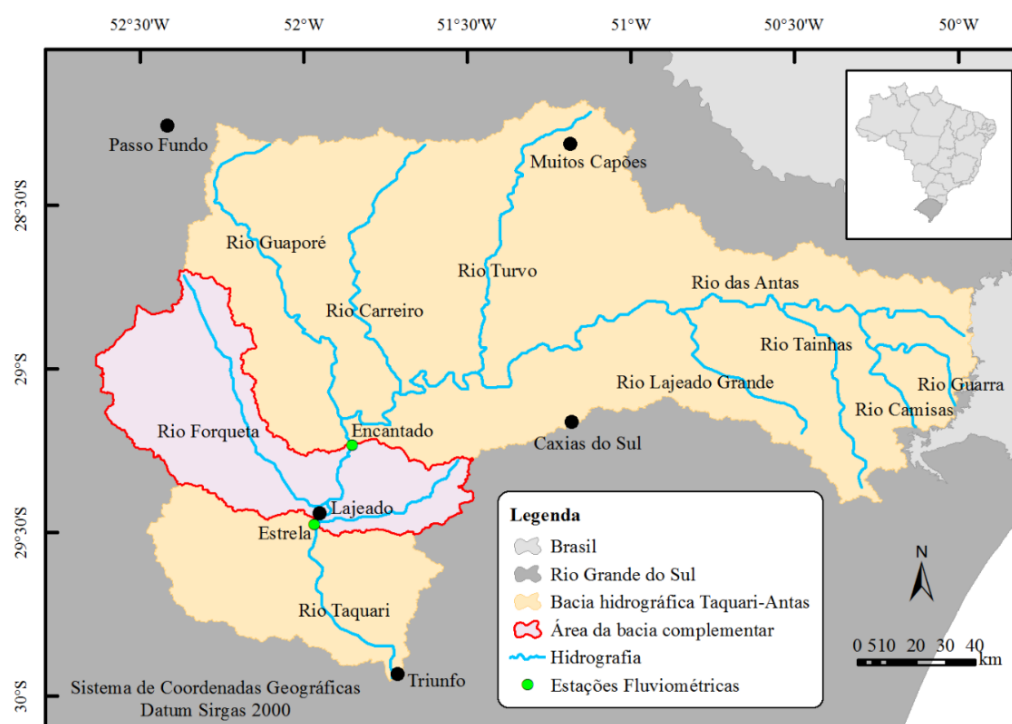
A bacia Taquari-Antas está inserida na região hidrográfica do Guaíba, composta por outras oito bacias hidrográficas: Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Pardo, Baixo Jacuí, Caí, Sinos, Gravataí e Lago Guaíba. Destaca-se que o rio Taquari-Antas é o principal afluente do rio Jacuí, que é o maior formador do Guaíba. Esta região hidrográfica possui uma área de 84.763,54 km² (30% do território estadual) e uma população de 5.869.265 habitantes, o que representa 61% da população do RS (FEPAM, 2017).

O município de Lajeado, por sua vez, está localizado entre as coordenadas de 29°24'06''S e 29°29'52''S, 51°55'06''W e 52°06'42''W, junto à margem direita do rio Taquari, no baixo curso do rio. A área territorial do município é de 90,087 km² e a população residente de mais de 71 mil habitantes, sendo a densidade demográfica superior a 790 hab./km² (IBGE, 2010; LAJEADO, 2017).

O rio Taquari-Antas tem suas nascentes nos municípios de Cambará do Sul, Bom Jesus e São José dos Ausentes a uma altitude acima de 1000 m, e percorre 530 km, no sentido nordeste-sudoeste, até desembocar no rio Jacuí, na cidade de Triunfo, onde a altitude é de aproximadamente 5 m. Os principais afluentes da margem esquerda são os rios Camisas, Lajeado Grande, Tainhas e São Marcos. Já, na margem direita, estão os rios Quebra-Dentes,

Carreiro, da Prata, Guaporé, Forqueta e Taquari-Mirim. Devido à grande extensão do rio, a bacia apresenta regiões com diferentes características topográficas, tipos de solo, cobertura vegetal, fauna, usos e cobertura do solo, dentre outros, que influem no regime hidrológico (FEPAM, 2001; FEPAM, 2017).

Figura 6 – Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas



Fonte: Da autora (2017).

Quanto à grande variação de altitude (FIGURA 7), a bacia pode ser dividida em três regiões distintas, denominadas, respectivamente, de alto, médio e baixo Taquari-Antas (FEPAM, 2001):

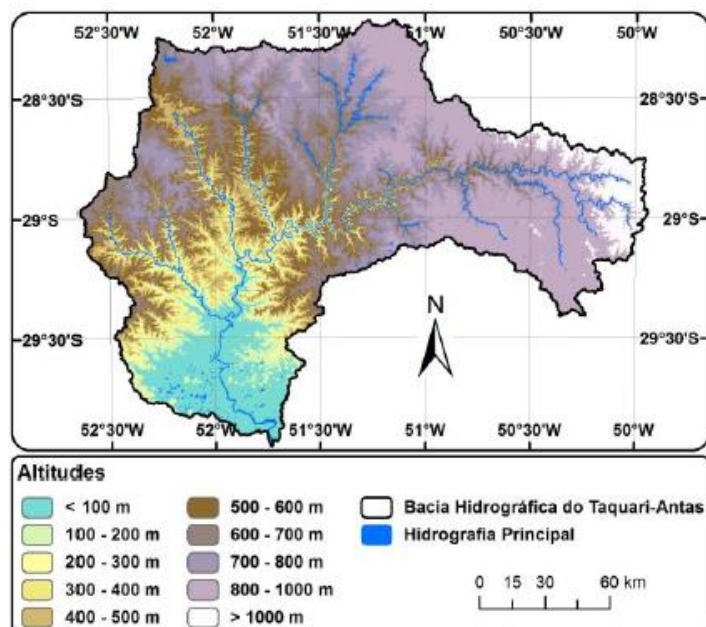
- altitudes superiores a 700 m: corresponde ao planalto entre as nascentes e a foz do rio Tainhas, sendo que neste trecho o rio Taquari-Antas apresenta declividade acentuada (média de 4,8 m/km), com afluentes encaixados e muitas corredeiras;

- altitudes entre 700 m e 200 m: compreende o trecho entre as fozes dos rios Tainhas e Guaporé, onde o rio tem declividade menos acentuada (média de 1,6 m/km), mas ainda com vales encaixados e corredeiras;

- altitudes inferiores a 200 m: corresponde ao trecho entre a foz do rio Guaporé e a confluência com o rio Jacuí, onde o rio apresenta pouca declividade (média de 0,2 m/km), raras

corredeiras e amplas áreas de planícies de inundação (FEPAM, 2001, BOMBASSARO; ROBAINA, 2010).

Figura 7 – Altimetria da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas



Fonte: OLIVEIRA et al. (2015).

É importante destacar que no médio trecho do rio Taquari-Antas, localiza-se o complexo de usinas hidrelétricas da Companhia Energética do Rio das Antas (CERAN), que compreende três usinas: Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, as quais totalizam 12,4 km² de área alagada. E, no baixo trecho do rio, a 65 km a montante da foz, está localizada a barragem-eclusa de Bom Retiro do Sul, que foi construída em 1976 a fim de permitir a navegabilidade do rio Taquari até o Porto Fluvial de Estrela (SIQUEIRA, 2015).

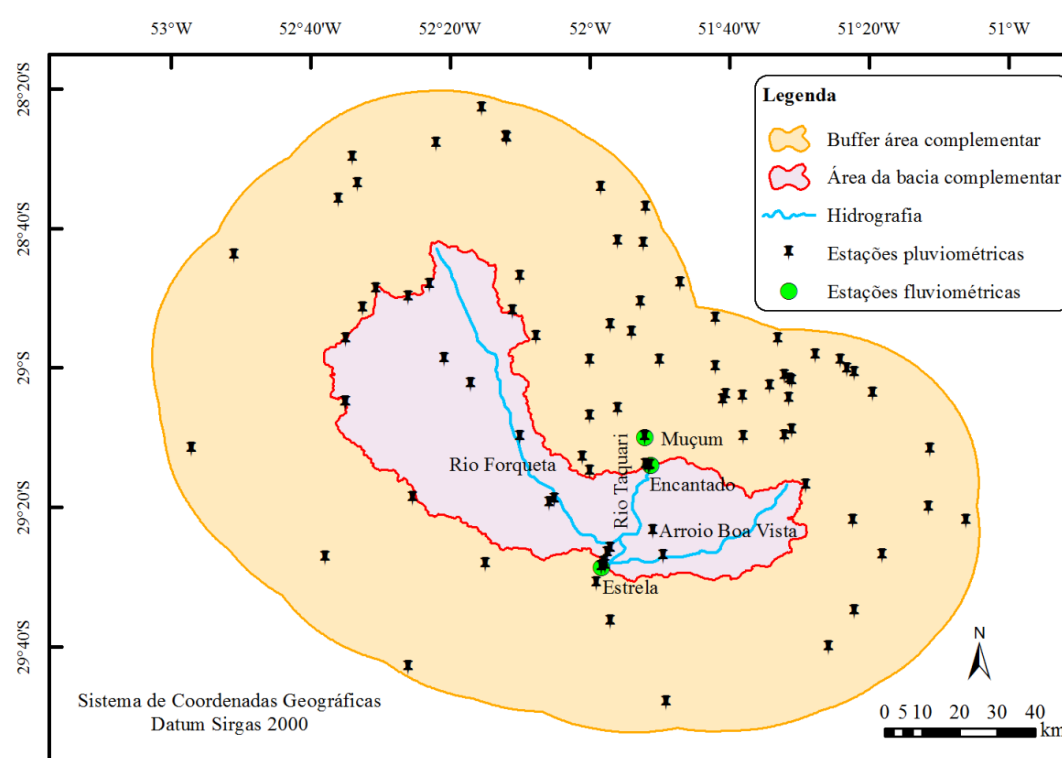
Conforme Ferri (1991) e FEPAM (2017), após a ocorrência de chuvas contínuas, de caráter frontal, sobre a bacia, concentram-se grandes volumes de água, que resultam em escoamentos rápidos e bruscas variações de vazões, que motivam inundações, principalmente no baixo curso do rio. Características naturais da bacia como declividade média elevada, densa rede de drenagem com conformação quase radial, pouca cobertura vegetal e baixa permeabilidade e profundidade dos solos contribuem para essa rápida concentração de vazões.

Segundo Kurek (2016), de acordo com a análise morfométrica, a bacia Taquari-Antas é enquadrada no formato alongado, devido aos seus índices de circularidade baixo ($I_c = 0,23$), de conformação médio ($K_f = 0,55$) e de compacidade alto ($K_c = 2,03$), indicando baixa propensão a inundações. No entanto, baseando-se na análise visual, a autora aponta que a bacia apresenta

forma próxima a circular, o que explica as inundações recorrentes na área. Uma das sub-bacias que apresenta maior amplitude altimétrica é a do rio Carreiro, o que influi em maior velocidade de escoamento, e, conseqüentemente, em efeitos a jusante. A autora destaca ainda que os principais afluentes desagüam praticamente ao mesmo tempo no rio principal, contribuindo para a rápida variação de vazão em períodos chuvosos.

A porção da bacia hidrográfica Taquari-Antas mais atingida pelas inundações, conforme já apresentado anteriormente e no Subcapítulo 3.3, é o baixo trecho do rio, onde se localizam os municípios de Lajeado e Estrela, que estão entre as cidades mais frequentemente assoladas por este evento hidrológico extremo (RECKZIEGEL, 2007; BOMBASSARO; ROBAINA, 2010; CEPED/UFSC, 2013). Em virtude disso, a área do presente estudo se restringirá apenas à bacia complementar da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas compreendida entre os municípios de Encantado e Estrela (FIGURA 8), com área de 4.070,34 km², tomando como limites as coordenadas dos linígrafos do “Projeto de Revitalização do Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes do Vale do Taquari” instaladas nestes municípios. Destaca-se que as informações destas e de outras estações hidrometeorológicas podem ser acessadas no site <<http://netsenses.univates.br>>.

Figura 8 – Delimitação da área de estudo: bacia complementar entre os postos fluviométricos de montante (Encantado) e jusante (Estrela)



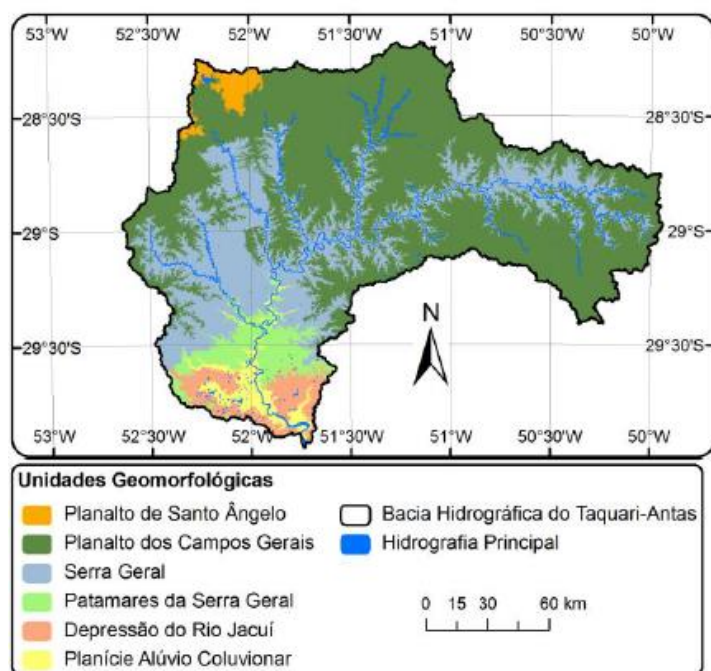
Fonte: Da autora (2017).

4.1.1 Geologia, geomorfologia e pedologia

Conforme Oliveira et al. (2015), a bacia Taquari-Antas é composta por seis Unidades Geomorfológicas (UG): Planalto dos Campos Gerais; Planalto de Santo Ângelo; Serra Geral; Patamares da Serra Geral; Depressão do Rio Jacuí e Planície Alúvio Coluvionar (FIGURA 9). As quatro primeiras se referem ao Planalto Meridional (Planalto e chapadas da bacia do Paraná) e, as duas últimas são relativas à Depressão Periférica (Central) (OLIVEIRA, 2010).

Segundo Ross (2009), o Planalto Meridional compreende terrenos vulcânicos de caráter básico a ácido, e sedimentares da bacia sedimentar do Paraná, sendo que o contato desta unidade com as depressões que a circundam é realizado através das escarpas (Serra Geral). O segmento da Serra voltado para a Depressão apresenta vales de rios encaixados em lineamentos estruturais, que descem em direção à Depressão, com direção preferencial NE-SW, como é o caso do Rio Taquari-Antas. O relevo destas áreas é acidentado, com vertentes íngremes e vales profundos e estreitos. Os solos da Serra Geral são predominantemente das tipologias Neossolos Litólicos e Chernossolos, mas, também podem ocorrer Argissolos, Latossolos e Nitossolos (IBGE, 2002; RECKZIEGEL, 2007).

Figura 9 – Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas



Fonte: OLIVEIRA et al. (2015).

A UG Patamares da Serra Geral é representada, predominantemente, por colinas e morros de topo convexo, com pequeno aprofundamento dos vales fluviais, onde prevalecem os

Nitossolos e os Chernossolos. Já, nas UGs Planalto dos Campos Gerais e Planalto Santo Ângelo, o relevo pode ser caracterizado de plano a ondulado, com topos de morros, principalmente convexos e tabulares (IBGE, 2002; OLIVEIRA et al., 2015). De acordo com IBGE (2002), nestes Planaltos predominam os Cambissolos, Nitossolos e os Latossolos, porém, também são comuns Neossolos, Argissolos e Chernossolos.

A Depressão Periférica Central se encontra esculpida na borda da bacia sedimentar do Paraná, sendo que na área prevalecem relevos esculpidos sobre as rochas de arenitos. A UG Depressão do Rio Jacuí apresenta um relevo sem grandes variações altimétricas, com colinas de topos convexos e alguns morros testemunhos. E, a UG Planície Alúvio Coluvionar, caracteriza-se por uma superfície plana, situada no nível inferior da bacia Taquari-Antas, nas adjacências das UGs Patamares da Serra Geral e Depressão do Rio Jacuí. É importante destacar que as várzeas dos principais rios da bacia estão inseridas na Depressão Periférica Central (ROSS, 2009; OLIVEIRA et al., 2015). Conforme IBGE (2002) junto à Planície Alúvio Coluvionar predominam os Chernossolos, enquanto que na Depressão do Rio Jacuí ocorrem Argissolos, Luvisolos e Planossolos.

4.1.2 Clima e precipitação

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da bacia Taquari-Antas é enquadrado como subtropical úmido, o qual se subdivide em duas variedades principais, o Cfa (clima temperado úmido com verão quente) e o Cfb (clima temperado úmido com verão temperado). A primeira, que abrange altitudes inferiores a 600 m, é caracterizada por apresentar temperaturas médias durante o mês mais frio entre -3°C e 18°C, e superiores a 22°C no mês mais quente. A precipitação é bem distribuída ao longo do ano e varia em torno de 1.400 mm. Já, a variedade Cfb predomina em áreas com cotas superiores aos 600 m e se diferencia pela temperatura média do mês mais quente, que é inferior a 22°C, e pela precipitação total anual (superior a 1.600 mm), em decorrência da altitude (FEPAM, 2001).

Rossato (2011), em seu estudo, propôs uma nova classificação climática para o RS, sendo que na bacia Taquari-Antas o clima é enquadrado como subtropical e se subdivide em duas tipologias: III (úmido com variação longitudinal das temperaturas médias) e IVb (muito úmido com inverno frio e verão fresco). Na primeira tipologia, que abrange predominantemente

a porção oeste da bacia, em que o rio já é denominado como Taquari e escoar no sentido norte-sul, a temperatura média durante o mês mais frio do ano oscila entre 11-14°C, e a do mês mais quente, entre 23-26°C. As precipitações são bem distribuídas ao longo do ano e apresentam um acumulado anual de 1700-1800 mm. Já, na segunda tipologia, que compreende a porção leste da bacia, em que o rio apresenta o nome de Antas e escoar no sentido leste-oeste, a temperatura média do mês mais frio varia entre 14-17°C, e durante o mês mais quente, entre 17-23°C. As precipitações, que também são bem distribuídas durante o período anual, são mais abundantes e oscilam entre 1700-2000 mm.

De acordo com Britto, Barletta e Mendonça (2006), a dinâmica das massas de ar atua decisivamente na distribuição térmica e pluviométrica do estado, inclusive da bacia. As massas que atuam no RS são: a Massa Tropical Atlântica (quente e úmida), a Massa Polar Atlântica (úmida e fria), e a Massa Tropical Continental (quente e seca). O encontro entre as Massas Polar Atlântica e Tropical Atlântica dá origem aos sistemas frontais, que costumam provocar chuvas duradouras sobre extensas áreas, preferencialmente entre o outono e a primavera, mas, com maior recorrência durante o inverno. São as chuvas de caráter frontal as principais causadoras das enchentes na bacia do Guaíba, sobretudo em anos de *El Niño*, em que muitas frentes polares ficam semiestacionadas sobre o RS (WOLLMANN, 2014).

Já, as massas tropicais têm maior atividade durante o período mais quente do ano e coincidem com a temporada de atuação de sistemas convectivos sobre o estado, dos quais se destacam os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) (OLIVEIRA, 2010). Estas instabilidades, normalmente se formam no sul do Paraguai, e durante o período noturno. Na sequência, avançam e alcançam o sul brasileiro, provocando intensa precipitação em um curto espaço de tempo (BRITTO; BARLETTA; MENDONÇA, 2006).

Segundo Rossato (2011), na região subtropical III, os sistemas frontais são os principais causadores de chuva, mas, também, influenciam os sistemas tropicais conjugados a efeitos de relevo, da continentalidade, da maritimidade e das áreas urbanizadas. Já, na região subtropical IVb, as precipitações ainda são predominantemente causadas por sistemas frontais, mas, há maior atuação de sistemas tropicais marítimos associados ao efeito relevo-altitude, que resultam em chuvas orográficas, as quais contribuem para que nessa região climática os acumulados anuais de precipitação sejam superiores. Bombassaro e Robaina (2010) comentam que as chuvas que ocorrem nas cabeceiras da bacia Taquari-Antas e que têm seus efeitos intensificados

pelas condições naturais de relevo, apresentam influência significativa na formação e ocorrência de inundações nas porções de vale da bacia.

4.1.3 Processo de ocupação e as inundações do rio Taquari-Antas

Segundo Ferri (1991), antes da chegada do homem branco, a bacia Taquari-Antas era habitada por várias tribos indígenas, mais expressivamente dos Kaingangs, que viviam junto às várzeas do rio e procuravam parte de seus alimentos nas águas. A partir do século XVII, com a chegada de colonizadores europeus, as populações indígenas que aqui viviam passaram por constante processo de expropriação de seu território, que ocorreu em duas frentes, por intermédio dos padres jesuítas (espanhóis) e dos bandeirantes (portugueses) (PBTA, 2011).

Após o Tratado de Madrid, a coroa portuguesa passou a dividir o território brasileiro em sesmarias a fim de garantir o domínio e a posse territorial, sendo que em 1747 é fundada a primeira sesmaria da bacia, chamada de Piedade, a qual se localizava junto à margem direita do rio Taquari, a partir de sua foz. Em 1752, também houve a concessão de sesmarias na região dos Campos de Cima da Serra e, em anos seguintes, nos campos de Vacaria (FERRI, 1991). Por conta disso, Ferri (1991) comenta, que o rio Taquari serviu como um caminho para que os futuros moradores chegassem a diferentes pontos das suas margens, dando inicialmente origem às sesmarias e fazendas, e, na sequência, vilas, povoados e cidades.

A intensificação da povoação da bacia do Taquari-Antas ocorreu entre o começo do século XIX com a chegada dos alemães, que se estabeleceram preferencialmente nos vales dos rios, e, o final do século XIX, com a vinda de imigrantes italianos, que se fixaram nas partes mais elevadas da bacia, nas margens do rio das Antas. As atividades agrícolas desenvolvidas por estes imigrantes contribuíram para a evolução econômica da bacia. Destaca-se que em 1856, houve a fundação da Fazenda Estrela, por Vitorino José Ribeiro, passando, o atual município de Estrela e municípios próximos como Lajeado, a serem habitados por imigrantes alemães (FERRI, 1991; PBTA, 2011).

De acordo com Ferri (1991), o rio Taquari é navegável até a cidade de Muçum e em 1857 foi criada a primeira linha regular de navegação pelos rios Taquari e Jacuí, entre a localidade de Taquari e Porto Alegre, sendo que além de pessoas, também eram transportados os produtos produzidos na bacia. A partir de 1860, o primeiro vapor “ESTRELA” passou a

transportar produtos, entre as cidades de Estrela e Porto Alegre, inclusive para portos intermediários. Em 1894 foi fundada a Companhia de Navegação Arroio do Meio, que contava com dois barcos a vapor para fazer o transporte desde Muçum até Porto Alegre. Na sequência surgiram outras companhias de navegação no rio Taquari.

Alves et. al. (2013) comentam que no Vale do Taquari, a ocupação ocorreu de forma desordenada junto às margens do rio Taquari, em virtude das suas várzeas férteis, da facilidade de escoamento da produção e de transporte por intermédio da navegação, que na época era o único meio de comunicação entre a capital e o interior do estado. Com isso, os núcleos urbanos de grande parte das cidades da bacia, inclusive de Lajeado e Estrela, se desenvolveram junto ao rio, na zona portuária.

Em virtude desta histórica ocupação das margens do rio Taquari-Antas, várias cidades, principalmente do baixo curso do rio, enfrentam problemas recorrentes com as cheias. Lajeado, por exemplo, é em média, atingido por uma inundação a cada ano, sendo que entre o período de 1940 e 2016 a cidade foi assolada por 88 eventos deste fenômeno hidrológico extremo. As maiores inundações, no município, ocorreram nos anos de 1941 (FIGURA 10), 1946, 1954, 1956 (FIGURA 11) e 2001 (FIGURA 12), quando as cotas do rio ficaram, respectivamente, 16,92 m; 14,4 m; 14,35; 15,86 e 13,95 m, acima do nível de referência, que é de 12,3 m. Destaca-se também, que nos últimos dois anos, a cidade foi atingida por cinco eventos de inundação, sendo que três ocorreram em 2015, num intervalo de 87 dias, entre julho e outubro, e duas foram registradas entre julho e outubro de 2016, num intervalo de 97 dias. A maior delas foi a ocorrida em outubro de 2016 (FIGURA 13), quando o rio ficou 12,26 m acima do seu nível normal e a inundação foi caracterizada como de média magnitude.

Figura 10 – Inundação de 1941 na rua Silva Jardim



Fonte: Arquivo Histórico de Lajeado (1941) apud Ferri e Togni (2012).

Figura 11 – Inundação de 1956 na esquina da rua Silva Jardim com a João Abott



Fonte: Arquivo Histórico de Lajeado (1956) apud Ferri e Togni (2012).

Figura 12 – Vista panorâmica da inundação de 03 de outubro de 2001



Fonte: Eckhardt (2008).

Figura 13 – Interrupção do tráfego na rua João Abott pela inundação de outubro de 2016



Fonte: Moraes (2016).

4.2 Base de dados e *softwares* utilizados

Neste subcapítulo são apresentados os materiais e *softwares* utilizados para o desenvolvimento do presente estudo:

- Série Histórica de Inundações: A série histórica de inundações do município de Lajeado foi obtida junto ao trabalho de Moraes (2015) e do banco de dados do Núcleo de Informações Hidrometeorológicas da Univates (NIH), com dados de 1940 a 2016. A série histórica de inundações do município de Encantado também foi disponibilizada pelo NIH.

- Dados Pluviométricos: Os dados pluviométricos de diferentes pontos da bacia complementar e de seu entorno foram obtidos no banco de dados do portal HidroWeb, do INMET, da CPRM, do Netsenses Univates e da estação meteorológica do NIH da Univates. Destaca-se que, em virtude de falhas, inativação de algumas estações meteorológicas e ainda, diferenças na data de instalação das mesmas, o período de dados pluviométricos varia entre as estações. Da mesma forma que, o intervalo de coleta de dados é variável, sendo de caráter diário no banco de dados do HidroWeb e nas estações convencionais do INMET; horário nas estações da CPRM e nas estações automáticas do INMET; a cada meia hora na estação meteorológica do NIH da Univates e, a cada 15 minutos nas estações do Netsenses;

- Dados Fluviométricos: Os dados fluviométricos do rio Taquari nas cidades de Lajeado/Estrela e Encantado foram obtidos no banco de dados do HidroWeb, da CPRM, do Netsenses Univates, do Porto Fluvial de Estrela e dos registros cedidos pelo Professor Luiz Fay Azambuja (antigo coordenador da AHSUL). O intervalo de coleta dos dados do HidroWeb, da CPRM e do Netsenses Univates é o mesmo que apresentado no item anterior. Já, o intervalo de registro de dados do Porto Fluvial de Estrela corresponde a 6 h, e, as cotas levantadas pela AHSUL, no município de Encantado, apresentam leitura a cada 8 h.

- ArcGis 10.1: Empregado na delimitação da área de entorno da bacia complementar para coleta de dados pluviométricos; para a espacialização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas na presente pesquisa, e; para a criação de uma malha regular para interpolação das chuvas;

- Microsoft ExcelTM: Utilizado na organização e consistência dos dados pluviométricos e fluviométricos; na acumulação e aplicação de filtros aos dados de precipitação; na análise exploratória dos dados de interesse; além da geração de gráficos e tabelas;

- MATLAB 2010a: Aplicado na identificação de estações pluviométricas próximas das estações a serem consistidas; na interpolação dos dados pluviométricos, e; no processamento das RNAs para a previsão de níveis fluviais em Lajeado.

- TableCurve 3D Version 4.0: Aplicado no processamento da técnica matemática de Regressão Múltipla (RM) para a previsão de níveis em Lajeado.

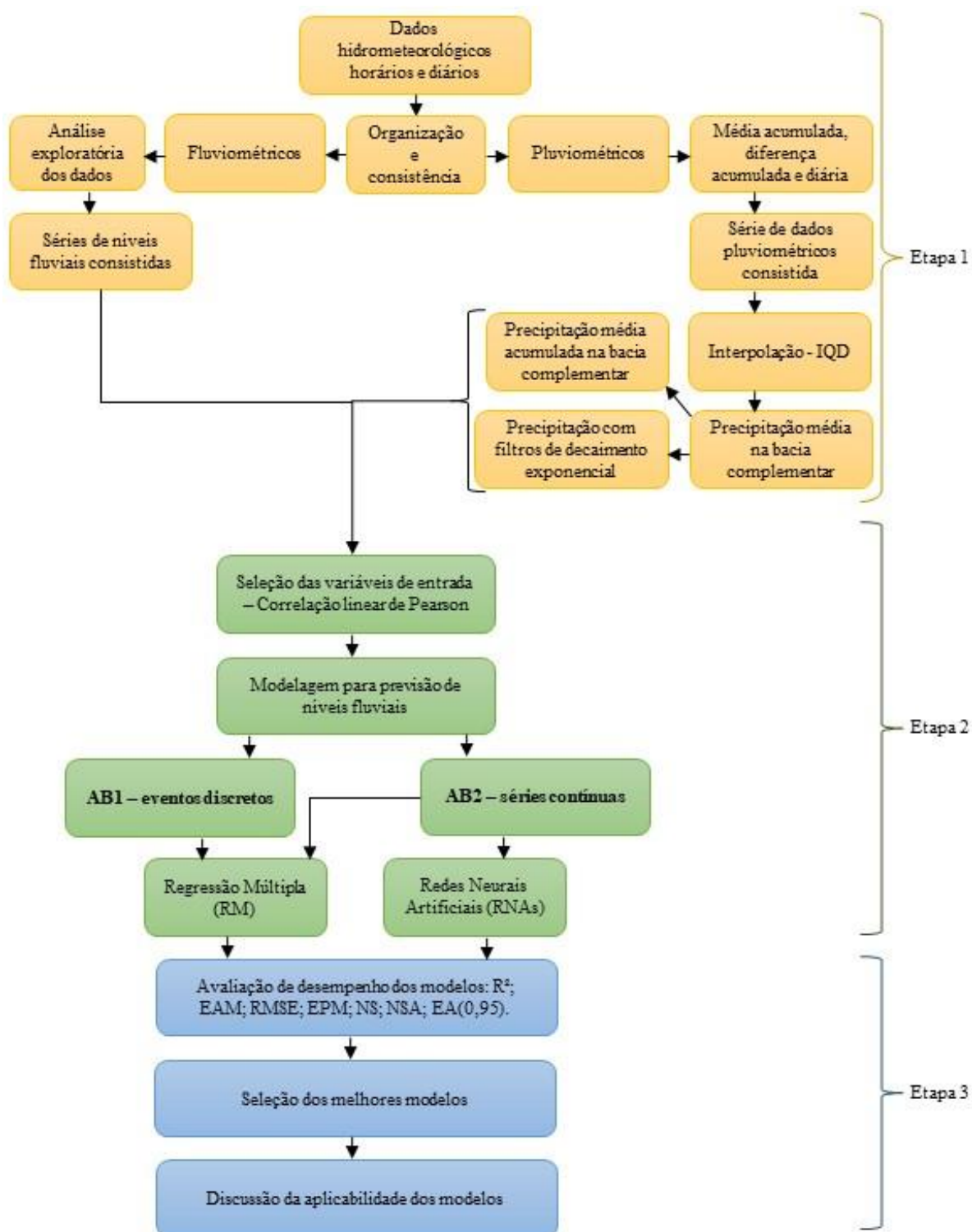
4.3 Procedimentos metodológicos

A metodologia está dividida em três etapas distintas (FIGURA 14) e sequenciais, a fim fornecer os subsídios necessários para o desenvolvimento e avaliação de duas abordagens matemáticas determinísticas e empíricas para previsão de níveis fluviais no município de Lajeado. Cabe salientar que a primeira abordagem (AB1) se refere a modelos matemáticos baseados em eventos discretos de inundação no município de Lajeado, de forma similar a Eckhardt (2008) e CIH (2013), que fez a atualização do modelo “cota-cota” proposto pelo primeiro autor. No entanto, além de considerar as cotas a montante de Lajeado, em Encantado, também se avaliou a possibilidade de emprego de dados de precipitação média da bacia complementar registrada e acumulada em x dias antecedentes ao evento de inundação em Encantado, e com filtros de decaimento exponencial, a fim aumentar a qualidade de previsão da cota na cidade de Lajeado. É importante destacar que, para que o modelo já forneça bons resultados a partir da cota de 16 metros em Lajeado, foram acrescentados alguns eventos pareados, em que os níveis máximos, neste município, ficaram entre 16 e 18,3 m. Ressalta-se que este modelo não tem um horizonte de previsão definido, embora se tenha conhecimento que o tempo de deslocamento de pico entre os municípios de Encantado e Lajeado é, em média, de 6 h (ECKHARDT, 2008).

A segunda abordagem (AB2) se refere a modelos matemáticos baseados em dados horários (6h, 12h, 18h, 0h) contínuos de níveis fluviais e, diários de precipitação, de forma similar a Pedrollo e Pedrollo (2013). Para a previsão dos níveis fluviais em Lajeado, com o tempo atual às 6h, foram considerados os níveis das cidades de Encantado e Lajeado com diferentes defasagens temporais, e variáveis de precipitação (média registrada e acumulada em diferentes intervalos de tempo e, com filtros de decaimento exponencial). O horizonte de previsão desses modelos é de 6 h, e, também, são aplicados para prever níveis mínimos, médios

e máximos, visto que empregam dados contínuos. Salienta-se, que foram testados outros horizontes de previsão, como 24 h à frente, mas, por conta da diminuição do desempenho com o aumento de seu alcance, optou-se por apresentar somente a modelagem num horizonte de 6 h à frente.

Figura 14 – Fluxograma metodológico do presente estudo



A primeira etapa para o desenvolvimento dessas abordagens consistiu no levantamento de dados hidrometeorológicos, horários e diários, disponíveis em diferentes fontes, a sua organização e consistência. Na sequência, foram manipulados os dados pluviométricos a fim de obter seus valores médios, acumulados e com filtros de decaimento exponencial. Na segunda etapa, aplicaram-se duas técnicas matemáticas, a Regressão Múltipla e as Redes Neurais Artificiais, para a modelagem dos níveis fluviais em Lajeado, considerando como dados de entrada as variáveis melhor correlacionadas linearmente à cota em Lajeado. E, por fim, na terceira etapa, realizou-se a análise de desempenho dos modelos, a fim de verificar a sua precisão e aplicabilidade.

4.3.1 Levantamento, organização e consistência dos dados hidrometeorológicos

Considerando que as estações pluviométricas estão mal distribuídas ao longo da bacia Taquari-Antas, além de apresentarem diferentes períodos de coletas de dados e séries temporais com períodos falhos, optou-se por empregar no presente estudo dados de estações pluviométricas além do limite da bacia complementar, a fim de obter um conjunto de dados mais representativo. Com o intuito de obedecer certa regularidade na escolha das estações, realizou-se um *buffer* de 40 km (FIGURA 8), com o auxílio do ArcGis 10.1, no entorno da bacia complementar, sendo que todas as estações pluviométricas, das diferentes fontes anteriormente mencionadas, com disponibilidade de dados de precipitação dentro desta área, foram selecionadas, conforme apresentado no Apêndice A. Destaca-se que para facilitar a identificação das estações do portal HidroWeb localizadas dentro da área de interesse, que se apresentam em grande número, foi selecionado um retângulo no entorno da bacia Taquari-Antas na plataforma WebGis da nova página do portal, sendo exportadas em formato “gdb” todas as estações hidrometeorológicas compreendidas dentro desta seleção. Ao integrar este arquivo com o *buffer* anteriormente criado, pôde-se identificar os dados de quais estações deveriam ser selecionados para o estudo. Das demais fontes de dados, a identificação das estações que deveriam ser incorporadas à pesquisa foi efetuada de forma visual. Já, os dados fluviométricos do rio Taquari nos municípios de Lajeado/Estrela e Encantado foram obtidos junto ao portal HidroWeb, à CPRM, ao Netsenses Univates, ao Porto Fluvial de Estrela e à AHSUL, sendo o período de dados disponíveis nas diferentes estações apresentados no Apêndice B. Salienta-se que os dados fluviométricos do Porto Fluvial de Estrela correspondem aos dados registrados na estação fluviométrica 86880000, disponível no HidroWeb, porém, ao

invés do registro em escala diária, os dados estão discretizados em leituras a cada 6 horas. Já os dados da AHSUL se referem aos dados da estação 86720000, também disponível no HidroWeb, mas, com registro de níveis a cada 8 h.

É importante esclarecer que para as AB1 foram considerados os dados das estações fluviométricas de Encantado e Lajeado/Estrela, bem como de estações pluviométricas com dados disponíveis, durante o período de 01/07/1940 a 31/12/2016. Já, para a AB2, consideraram-se os dados horários das estações fluviométricas localizadas em Encantado e Estrela, bem como os dados diários das estações pluviométricas com informações, durante os períodos de 15/08/1980 a 31/12/2007 e 01/08/2015 a 31/12/2016. Contudo, destaca-se que durante os períodos selecionados há intervalos com falhas, que foram excluídos das séries de dados hidrometeorológicos.

A organização dos dados hidrometeorológicos foi realizada de acordo com a necessidade de cada abordagem, sendo que os dados pluviométricos diários, necessários para a AB1 e a AB2, foram organizados em planilha ExcelTM, de modo que cada coluna corresponde a uma estação e cada linha ao dado diário de chuva. Os dados sub-diários foram transformados para a escala diária, a partir da função “SOMASE” do ExcelTM, a fim de compatibilizar as informações. Destaca-se que as estações que possuem dados consistidos, estes foram os utilizados no presente estudo. Quanto às estações que apresentavam somente dados brutos, antes de utilizá-los, foi realizada uma análise de consistência apenas naquelas com mais de 10 anos de dados. Ou seja, àquelas com dados brutos num período inferior a 10 anos foram consideradas como consistidas, a fim de otimizar o desenvolvimento do presente trabalho.

Para a análise de consistência, inicialmente, identificaram-se as estações próximas da estação a ser consistida num raio de 30 km, por intermédio do editor de *scripts* do *software* MATLAB R2010a. Na sequência, os valores médios dos dados diários de chuva nas estações próximas foram comparados aos dados de precipitação registrados na estação a ser consistida, avaliando-se junto aos gráficos do ExcelTM, o comportamento dos valores acumulados ao longo do tempo e das diferenças provenientes do comparativo de ambas. Ao identificar dados inconsistentes, estes, foram, em sua maioria, excluídos, sendo mantidos somente alguns para possibilitar as próximas etapas deste estudo, uma vez que havia baixa disponibilidade de informações em outras estações para o período.

Os dados fluviométricos também foram organizados em planilhas de dados, sendo que em ambas, as colunas correspondem às estações fluviométricas. Com relação às linhas, para a AB1 cada uma corresponde a um nível de cheia. Já, na planilha da AB2, cada linha se refere ao dado horário de cota, destacando-se que a série de Encantado, junto à AHSUL, apresenta somente 3 leituras diárias de nível, de modo que os dados junto a esta estação foram organizados nos seguintes horários: 6h, 12h e 18 h. Já, a série de Lajeado fora ordenada às 0h, 6h, 12h e 18h. Da mesma forma que realizado com os dados pluviométricos, foram utilizados os dados consistidos das estações fluviométricas. E, nas que somente existiam dados brutos de nível, estes foram comparados à estação a montante, verificando-se a partir da aplicação de gráficos no *software* ExcelTM, a existência de cotas inconsistentes. Como o conjunto de dados era satisfatório, os dados inconsistentes foram descartados. Salienta-se que durante o processo consistência dos dados hidrometeorológicos não foi realizado o preenchimento de falhas.

4.3.1.1 Ajuste dos dados pluviométricos

Nessa etapa foram manipulados os dados de precipitação anteriormente organizados e consistidos, a fim de obter as chuvas médias, acumuladas e com filtros de decaimento exponencial, que foram empregadas nas diferentes abordagens matemáticas para a previsão de níveis fluviais na cidade de Lajeado. Como a chuva apresenta variabilidade espacial e temporal, para se obter a precipitação média da bacia para cada dia utilizado como dado de entrada, tornou-se necessária a interpolação dos dados de chuva das estações pluviométricas selecionadas para o estudo. Para tanto, inicialmente, foi criada uma malha regular com distância de 10 km entre um nó e outro dentro da área da bacia de estudo, no *software* ArcGis 10.1. Sabendo as coordenadas de cada ponto criado pela malha e das estações pluviométricas, pôde-se realizar a interpolação dos dados de precipitação das estações selecionadas junto ao editor de *scripts* do *software* MATLAB R2010a, aplicando-se o método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Para garantir uma interpolação eficaz, adotaram-se alguns critérios necessários para que o processo fosse realizado, tal como, a definição de um raio de 100 km no entorno do nó para a consideração das estações; a necessidade de existência de estações em pelo menos três quadrantes, e; a consideração dos dados de precipitação das três estações mais próximas em cada quadrante, podendo ser empregados os dados de chuva de no máximo 12 estações pluviométricas na interpolação de cada nó. É importante esclarecer que o IQD considera que a chuva média em determinado local é obtida a partir do fator de ponderação do

inverso do quadrado da distância euclidiana, de modo que os pluviômetros mais próximos têm um peso maior no cálculo da média (SOUZA et al., 2010; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A equação do IQD (SOUZA et al., 2010) empregada para a interpolação é apresentada a seguir.

$$Pi = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d^2} x_i\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d^2}\right)} \quad (1)$$

Em que: Pi = precipitação interpolada (mm); x_i = precipitação do i -ésimo posto pluviométrico vizinho (mm); d = distância euclidiana entre o i -ésimo ponto da vizinhança e o ponto amostrado.

A acumulação da chuva interpolada média de 2 a 20 dias antecedentes foi realizada na própria planilha ExcelTM, empregando-se a função “SOMA”. Já, os filtros de decaimento exponencial foram aplicados aos dados de chuva na planilha ExcelTM, baseando-se na Equação 2 (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015) a seguir:

$$fP_t = (1 - \alpha)fP_{t-1} + \alpha P_t \quad (2)$$

Em que: P_t = precipitação no tempo t ; fP_t e fP_{t-1} = valores de precipitação transformados pela aplicação do filtro de decaimento exponencial, nos tempos t e $t-1$, respectivamente; α = coeficiente calibrado por ensaios, a fim de aumentar a correlação linear (r) entre a variável filtrada e a observada. No presente estudo, esses coeficientes foram calibrados pelo suplemento Solver do ExcelTM, considerando, para a AB1, as cotas médias diárias registradas no município de Lajeado entre o período de 1980 e 2012, e; para a AB2, os dados fluviométricos observados na cidade de Lajeado às 12h, entre período de 1980 e 2016.

Segundo Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) a aplicação destes filtros em modelagens hidrológicas estritamente numéricas e sem base física é fundamental, pois esta variável fornece a condição de água que está armazenada (umidade) no solo em dias anteriores à previsão, dando ao modelo a capacidade de simular o fluxo observado nos rios. Em virtude disso, os autores comentam que o uso destas variáveis na modelagem se torna mais importante do que o emprego de dados brutos de precipitação.

4.3.2 Calibração dos diferentes modelos matemáticos

No decorrer deste subcapítulo são apresentados os procedimentos metodológicos empregados para seleccionar as variáveis melhor correlacionadas linearmente à cota em Lajeado, bem como, as técnicas matemáticas de Regressão Múltipla e Redes Neurais Artificiais aplicadas na modelagem dos níveis fluviais na cidade de Lajeado.

4.3.2.1 Análise de correlação linear

A partir dos dados fluviométricos e pluviométricos manipulados e consistidos foi elaborada uma nova planilha de dados para cada abordagem, a fim de seleccionar os melhores conjuntos de variáveis de entrada para previsão de níveis na cidade de Lajeado por intermédio de análise de correlação linear. Nesta planilha, cada coluna se refere a uma variável de entrada, e cada linha aos seus respectivos dados, sendo que as entradas consideradas para cada abordagem são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis de entrada consideradas em cada abordagem

Abordagem	AB1	AB2
Entradas	Nm (máx); P (t...t-z); Pacum (xd); Pf	Nj (t...t-z); Nm (t...t-z); P (t...t-z); Pacum (xd); Pf
Saídas	Nj (máx)	Nj (t+6)

Em que: *Nm* e *Nj* = níveis fluviais nas cidades de Encantado e Lajeado, respectivamente; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo; *máx* = nível máximo; *t+6* = previsão de nível 6 h à frente; *P* = precipitação média na bacia complementar; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

Fonte: Da autora (2017).

A análise de correlação linear entre as variáveis de entrada com o nível fluvial em Lajeado foi realizada no próprio ExcelTM, a partir da função “PEARSON”. Esta se refere ao Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R), que é empregado para medir o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias, sendo representado pela Equação 3 (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010).

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i - F}{S_f} \right) \left(\frac{O_i - O}{S_o} \right) \quad (3)$$

Em que: F_i e O_i = observações simultâneas das variáveis de aleatórias no intervalo de tempo i ; F e O = médias das variáveis aleatórias; S_f e S_o = desvio padrão das variáveis aleatórias; n = tamanho da amostra.

De acordo com Akamine e Yamamoto (2013) o R apresenta um valor limitado entre -1 e 1, sendo que seu valor indica o grau de correlação linear entre as duas variáveis analisadas e o seu sinal indica o tipo de correlação, podendo ser negativa ($r < 0$) ou positiva ($r > 0$). Quando o valor de R é exatamente -1 ou 1, a correlação é dita perfeita e todos os pontos caem sobre uma reta. Já, quando o valor de R é igual a 0, tem-se que não existe correlação linear entre as variáveis. Os autores supracitados salientam que uma correlação perfeita é difícil de ocorrer em dados experimentais, sendo que quando existe uma correlação linear forte o valor de R deve ser próximo de $|1|$. Portanto, para o presente estudo, serão selecionados como dados de entrada aqueles que apresentarem valores mais próximos de $|1|$.

Com os dados de entrada selecionados para modelar a saída, que seria o nível do rio Taquari no município de Lajeado, fez-se a aplicação de técnicas matemáticas para a previsão das cotas, sendo uma delas a RM, e a outra, baseada em RNAs. A AB1 foi testada apenas com o método de RM, enquanto que para a AB2, aplicaram-se as duas metodologias. Cabe destacar que para cada abordagem, em torno de 75 a 80 % dos dados foram separados para a calibração dos modelos matemáticos, tomando-se o cuidado de estarem compreendidos neste conjunto, valores de níveis extremos, visto que modelos empíricos não possuem boa capacidade de extrapolação. O restante dos dados, cerca de 20 a 25 %, foram empregados para a validação dos modelos.

4.3.2.2 Ajuste dos modelos com regressão múltipla

Segundo Hair et al. (2005) e Coelho-Barros et al. (2008) a regressão é uma técnica estatística que investiga e modela a relação entre variáveis, sendo que quando se objetiva prever uma variável dependente (y) a partir de uma única variável independente (x) conhecida, tem-se uma regressão simples. Já, quando são consideradas duas ou mais variáveis independentes (x_1, x_2, \dots, x_n) explicativas, a técnica de regressão é definida como múltipla.

O modelo genérico da RM é representado pela Equação 4 (HAIR et al., 2005), mas, também foram testadas outras configurações, a fim de encontrar a melhor equação para a previsão de níveis em Lajeado.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (4)$$

Em que: y = variável dependente; x = variáveis independentes; β = coeficientes de regressão (parâmetros); ε = erro aleatório.

Spiegel, Schiller e Srinivasan (2013) complementam dizendo que o principal objetivo do modelo de regressão é ajustar uma curva que melhor represente a relação entre as variáveis, dependente e independente, sendo que a partir da função matemática desta curva é possível estimar a variável dependente por intermédio de variáveis independentes conhecidas. Conforme Dornelles (2007), o ajuste do modelo ocorre através da obtenção de valores para os parâmetros β que resultem no menor valor para a soma dos resíduos, $(\sum (y - \varepsilon))$, gerados a partir da amostra de calibração. Um dos procedimentos utilizados, e que foi aplicado neste estudo, é o Método dos Mínimos Quadrados. Este adota a curva que resulta na menor soma dos quadrados dos erros ou resíduos da regressão (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Destaca-se, que nesta pesquisa, a variável dependente se refere à previsão de nível no município de Lajeado, e as variáveis independentes correspondem aos dados de entrada de cada abordagem.

A técnica de RM foi aplicada com o *software* TableCurve 3D Version 4.0, que ajusta os dados a milhares de equações lineares e não lineares pré-definidas, a partir dos algoritmos de Eliminação Gaussiana e Levenberg-Marquardt. A equação para a previsão de níveis em Lajeado foi selecionada pela ferramenta *F-statistic*, que a partir da Equação 5, elenca a função mais parcimoniosa, ou seja, com menor número de parâmetros que descrevam adequadamente as características dos dados.

$$F - statistic = \frac{\frac{SSM - SSE}{m-1}}{MSE} \quad (5)$$

Em que: SSM = soma dos resíduos ao quadrado, provenientes da diferença entre o valor da variável dependente registrada em relação à média registrada; SSE = soma dos resíduos ao quadrado, provenientes da diferença entre o valor previsto em relação ao registrado; m = número de coeficientes da equação; MSE = erro quadrático médio.

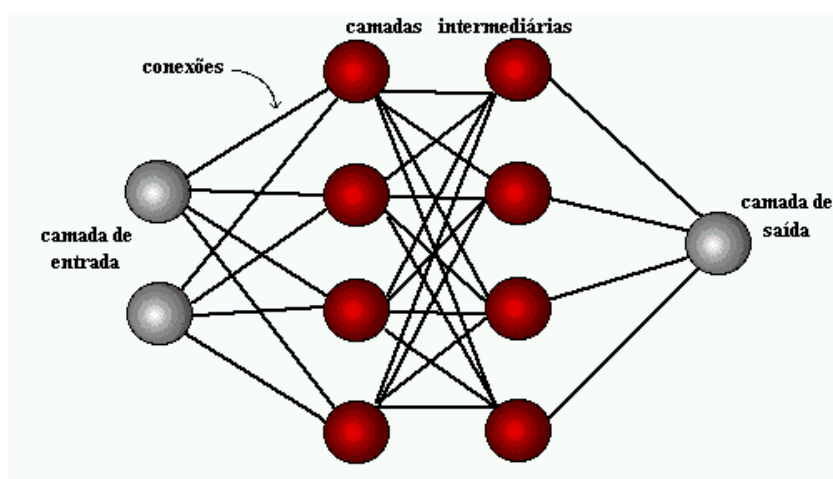
4.3.2.3 Ajuste dos modelos com redes neurais artificiais

As RNAs, segundo Dornelles (2007), surgiram da tentativa de representar matematicamente o princípio de funcionamento de um neurônio biológico, sendo, em virtude disso, o elemento fundamental deste modelo empírico e estocástico, o neurônio artificial, que se trata de uma evolução do modelo de McCullosh e Pitts (1943). A composição elementar do neurônio artificial consiste em uma função de soma ponderada das entradas, que também são denominadas de estímulos, e uma função de ativação, normalmente não linear, que realiza a modificação da soma ponderada, resultando em um sinal que corresponde à resposta desejada, conforme os parâmetros associados às entradas (pesos sinápticos) vão sendo adequados. O procedimento para ajustamento destes parâmetros se refere ao treinamento da rede neural (PEDROLLO; PEDROLLO, 2013). Segundo Guarnieri (2006), uma vez que a RNA estiver treinada, seus pesos são fixados, e ela pode ser utilizada como um modelo para estimar a saída a partir de um dado de entrada. O princípio de funcionamento de um neurônio artificial pode ser representado pela Equação 6 (BRAVO et al., 2008).

$$S = F(\sum_{i=1}^n w_i E_i + b) \quad (6)$$

Em que: S = valor da resposta do neurônio; F = função de ativação; w_i = pesos sinápticos; E_i = valores das entradas que são processadas no neurônio; b = tendência do valor de saída.

Figura 15 – Representação das camadas de uma RNA



Fonte: ICMC-USP (2017).

Conforme pode ser observado na Figura 15, as RNAs, geralmente, apresentam três camadas com neurônios artificiais, a de entrada, a (s) intermediária (s), e a de saída. A camada de entrada é a que recebe as informações, e onde os padrões serão, inicialmente, apresentados

à rede. Nas camadas intermediárias ocorre a extração das características do processo/sistema que está se deduzindo, sendo que nestas camadas, é realizado quase todo o processamento da rede. E, finalmente, na camada de saída, é apresentado o resultado alcançado, a partir do processamento da rede (YONEDA, 2014). Pedrollo e Pedrollo (2013) comentam que as saídas dos neurônios das camadas anteriores correspondem aos dados de entrada dos neurônios das camadas posteriores. Por isso, é adotado um termo de tendência (b) para cada neurônio, de modo que ele possa assumir valores diferentes de zero para a saída, mesmo quando as entradas líquidas são nulas.

A RNA pode apresentar várias camadas internas, mas, a adotada neste estudo pode ser representada genericamente pela Equação 7, que apresenta apenas uma camada intermediária (PEDROLLO; PEDROLLO, 2013).

$$y = f_s (\sum_h W_s f_h (\sum_e W_h X + b_h) + b_s) + e_s \quad (7)$$

Em que: x , y = matrizes com as estradas (e) e as saídas (s), respectivamente; W_h , b_h , W_s , b_s = pesos sinápticos e tendências das camadas interna (h) e de saída (s), respectivamente; f_h e f_s = funções de ativação, respectivamente, das camadas interna e de saída; e_s = erro esperado na camada de saída.

De acordo com Gomes, Montenegro e Valença (2010), as variantes de uma RNA são muitas, a exemplo do número de neurônios nas camadas de entrada, intermediária e de saída, sendo que a diferente combinação destes permite modificar a arquitetura da RNA, conforme a necessidade de aplicação. Nesta pesquisa, a escolha de uma arquitetura de três camadas foi baseada no teorema da existência de redes neurais de mapeamento de Kolmogorov (HECHT-NIELSEN, 1987 apud OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015), o qual afirma que qualquer função contínua com n entradas pode ser implementada exatamente por uma rede neural progressiva de três camadas com $2n+1$ neurônios de processamento na camada intermediária. Desta forma, o número de neurônios da (s) camada (s) intermediária (s) varia conforme o número de variáveis de entrada. Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) comentam que em testes preliminares a adoção desta metodologia apresentou resultados satisfatórios sem grande esforço computacional.

A função de ativação empregada tanto da camada interna como de saída foi a sigmoide unipolar, que conforme Pedrollo e Pedrollo (2013) é a mais empregada para solucionar a não linearidade das redes neurais. Esta função apresenta saídas no intervalo $[0, 1]$, cuja derivada

pode ser calculada única e exclusivamente pela saída, conforme apresentado nas Equações 8 e 9, a seguir (PEDROLLO; PEDROLLO, 2013).

$$a = f(n) = \frac{1}{1+e^{-n}} \quad (8)$$

$$f'_{(n)} = a(1 - a) \quad (9)$$

Em que: a = saída da função de ativação; n = entrada líquida, que consiste na soma ponderada das entradas.

Matos (2012) esclarece que pode ser estabelecido um valor mínimo para o resultado da derivada, de modo que o treinamento não resulte em valores zerados, como ocorre com os extremos das variáveis de saída. Outra alternativa para contornar a ocorrência de derivada zerada é escalonar a variável de saída entre extremos escolhidos, de modo que a variável de saída escalonada nunca apresente valores exatamente nos extremos 0 e 1.

Ainda, de acordo com o autor supracitado, em virtude das funções de ativação possuírem domínios de saída restritos, as RNAs, na maioria dos problemas práticos, referem-se a partes de modelos, compostos de transformações de dados, os quais podem ser lineares e não-lineares. Ao utilizar o escalonamento linear, tanto para as entradas como para as saídas, o modelo resultante pode ser representado pela Equação 10 (MATOS, 2012), a seguir.

$$\frac{y_t - bu}{au} = RN \left(\frac{(x_t - be)}{ae} \right) \quad (10)$$

Em que: x_t e y_t = variáveis de entrada e de saída, respectivamente; au e bu = parâmetros de escala e de posição das saídas do modelo; ae e be = parâmetros de escala e de posição das entradas do modelo; RN = rede neural utilizada.

Para o treinamento da RNA empregou-se o algoritmo de retropropagação (Rumelhart et al., 1986), que consiste num procedimento de procura dos pesos sinápticos que minimizam os erros de saída baseado em duas etapas. Na primeira, as entradas da rede são propagadas, de camada em camada, até resultarem em saídas, as quais são comparadas com as desejadas, gerando um erro. Em seguida, este erro é retropropagado a partir da saída da rede até a sua camada inicial, havendo o ajuste dos pesos sinápticos de cada neurônio em cada iteração k conforme a Regra Delta de treinamento. A repetição deste processo permite encontrar

resultados cada vez melhores e com erros menores, à medida que as repetições do procedimento (ciclos) são aplicadas (MATOS, 2012; OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015). É importante destacar que a Regra Delta foi originalmente formulada por Widrow e Hoff (1960) para redes neurais de apenas uma camada, conforme a Equação 11.

$$W_{k+1} = W_k + (T e_k \delta_k P_k) \quad (11)$$

Em que: W_k = pesos sinápticos atuais; T = taxa de aprendizado; e_k = erros das saídas da camada; δ_k = derivadas das funções de ativação; P_k = entradas na camada, na iteração k .

O erro calculado pelo método retropropagativo em uma camada com base na camada posterior é obtido pela Equação 12 (MATOS, 2012).

$$e_h = \sum (W_s e_s \delta_s) \quad (12)$$

Em que: e_h = erro na camada de entrada; W_s = pesos sinápticos na camada de saída; e_s = erros na camada de saída; δ_s = derivadas da função de ativação na saída.

Considerando que os valores iniciais dos parâmetros se apresentam de forma aleatória à RNA, nesta pesquisa, o treinamento foi realizado 30 vezes, de forma iterativa, sendo ao final adotado o modelo que apresentar melhor desempenho. Este número de treinamentos foi fixado com base no estudo de Dornelles, Goldenfum e Pedrollo (2013), que verificou que após 30 iterações os melhoramentos de desempenho foram pouco significativos.

Já, o número máximo de ciclos em cada iteração foi definido por um número de testes (10.000; 150.000, e, 250.000) usando cada série hidrológica, verificando o número de ciclos necessários para estabilizar os erros no ponto em que o coeficiente de desempenho divergiu, tal como fizeram Oliveira, Pedrollo e Castro (2015). Destaca-se que o número de ciclos necessários para estabilizar os erros nunca foi maior do que o número de ciclos em qualquer experiência.

Também é importante mencionar que foi empregado um algoritmo para a simplificação da RNA, a partir da exclusão de variáveis de entrada que o método considera menos importantes, conforme Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) fizeram e detalharam em seu estudo. A única adaptação à metodologia apresentada pelos autores do algoritmo se refere à exclusão de uma variável de entrada por vez.

Conforme Haykin (1994) e Guarnieri (2006), a fase de treinamento se encerra quando o erro atingir um valor mínimo pré-estabelecido ou quando a taxa de variação desse erro alcançar um valor definido como critério de parada. No entanto, o treinamento da rede até atingir erros mínimos não garante que ela possua a capacidade de modelar um conjunto de dados diferente daqueles utilizados no treinamento, podendo o erro deste novo conjunto ser elevado. Este fenômeno é chamado de “superajustamento”, em que a RNA decorou os dados, ao invés de extrair seus padrões.

Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) comentam que o excesso de ajuste pode ser evitado com a interrupção antecipada do treinamento através da técnica de validação cruzada, também aplicada no presente estudo. Para tanto, o modelo requer três séries de dados, a de treinamento (50% dos dados), a de validação (25%) e a de verificação (25%). A série de validação, na qual o desempenho do modelo é avaliado em cada iteração do procedimento de treinamento usando a série de treinamento, serve para identificar onde o coeficiente de desempenho começa a divergir e o treinamento é então interrompido, uma vez que essa divergência sinaliza o início do ajuste excessivo. Já, o conjunto de dados de verificação permite avaliar a capacidade de generalização da RNA, ou seja, o seu desempenho perante a um novo conjunto de dados.

O processo de treinamento, validação e verificação das RNAs a partir dos dados selecionados para a AB2, do presente estudo, foi realizado com o editor de *scripts* do *software* MATLAB R2010a.

4.3.3 Análise de desempenho dos modelos matemáticos

A análise de desempenho dos modelos matemáticos foi realizada com base nas medidas de qualidade calculadas para cada um dos modelos, tais como o coeficiente de determinação (R^2); o erro absoluto médio (EAM); a raiz do erro quadrático médio (RMSE); o erro proporcional médio (EPM); o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS); o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe adaptado (NSA), e o quantil 0,95 dos erros absolutos (EA(0,95)).

O coeficiente de determinação (R^2) (EQUAÇÃO 13) é definido por Hair et al. (2005) como uma medida da proporção da variância da variável dependente em torno de sua média, que é explicada pelas variáveis independentes. O seu valor varia entre 0 e 1, sendo que quanto

mais próximo de 1 melhor é a qualidade do modelo em prever os níveis fluviais no município de Lajeado.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_m)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2} \quad (13)$$

Em que: O_m = média do valor observado da variável dependente; O_i = valor observado da variável dependente no intervalo de tempo i ; F_i = valor previsto a partir das variáveis independentes no intervalo de tempo i ; N = tamanho da amostra.

O erro absoluto médio (EAM) (EQUAÇÃO 14) é uma medida de qualidade empregada para medir o quão próximo são as previsões de um modelo ao dado real, sendo o seu valor dado em módulo. O seu valor oscila de 0 ao infinito, e quanto mais próximo de 0 melhor a qualidade de previsão do modelo (WWRP/WGNE, 2017).

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (14)$$

Em que: F_i = valor previsto no intervalo de tempo i ; O_i = valor observado no intervalo de tempo i ; N = tamanho da amostra.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) (EQUAÇÃO 15), também é uma medida da magnitude média dos erros, com valores que variam de 0 ao infinito. Assim como o EAM, quanto mais próximo de 0 for o seu valor, maior é a precisão do modelo matemático. Por se tratar de uma média quadrática, os erros maiores apresentam maior influência sobre seu valor final do que os erros menores (WWRP/WGNE, 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (15)$$

Em que: F_i = valor previsto no intervalo de tempo i ; O_i = valor observado no intervalo de tempo i ; N = tamanho da amostra.

O erro proporcional médio (EPM) (EQUAÇÃO 16), assim como os erros anteriores, é uma medida da magnitude média dos erros de previsão, sendo que seu valor varia de 0 a 100%, e quanto mais próximo de 0%, maior é a habilidade do modelo em prever as cotas de Lajeado.

$$EPM = \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (EAM)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i)} \right) \cdot 100 \quad (16)$$

Em que: EAM = erro absoluto médio; O_i = valor observado no intervalo de tempo i ; N = tamanho da amostra.

O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), por sua vez, é empregado para determinar a qualidade de ajuste de modelos hidrológicos (Nash e Sutcliffe, 1970), a partir da aplicação da Equação 17.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_{i+t} - F_{i+t})^2}{\sum_{i=1}^N (O_{i+t} - O_m)^2} \quad (17)$$

Em que: F_i = valor previsto; O_i = valor observado; O_m = valor médio observado; t = tempo de antecedência da previsão; N = tamanho da amostra.

Conforme Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016) o valor de NS varia entre o infinito negativo e 1, sendo que quando igual a 1 indica um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados, já o resultado ≤ 0 representa que a utilização da média dos dados observados é melhor do que o emprego dos dados simulados. Motovilov et al. (1999) e Liew et al (2007), complementam dizendo que quando o valor de NS é superior a 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de NS, entre 0,75 e 0,36, a simulação é enquadrada como satisfatória.

Tucci (2005) salienta que a Equação 17 faz um comparativo entre a redução do desvio quadrático do erro do modelo com o desvio quadrático do modelo alternativo de prever sempre a média dos valores. Como não existe lógica em elaborar um modelo matemático que sempre preveja a média dos dados, pode-se usar um modelo alternativo que emprega o valor atual (tempo t), tendo-se, então, uma adaptação do coeficiente (EQUAÇÃO 18). Salienta-se que esta medida de desempenho somente pode ser empregada para séries de dados contínuos.

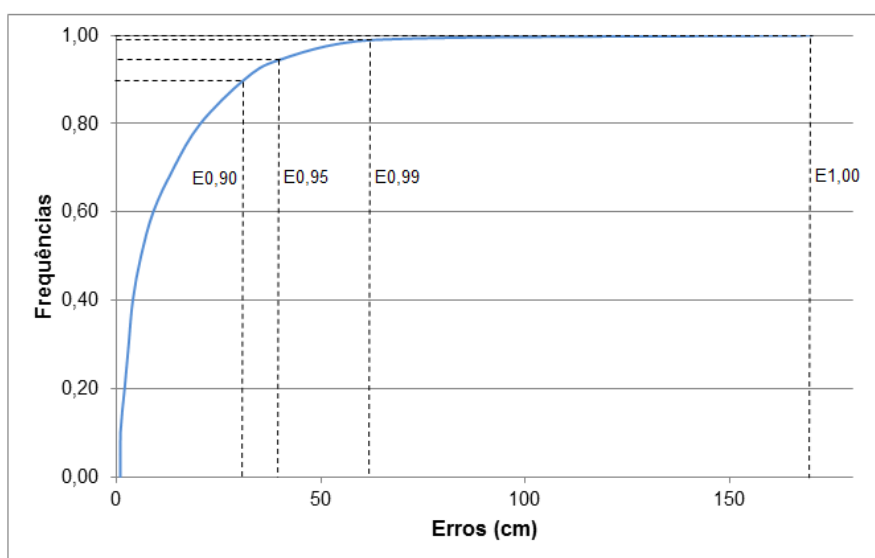
$$NSA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_{i+t} - F_{i+t})^2}{\sum_{i=1}^N (O_{i+t} - O_t)^2} \quad (18)$$

Em que: F_i = valor previsto; O_i = valor observado; O_t = valor observado atual; t = tempo de antecedência da previsão; N = tamanho da amostra.

Ainda segundo Tucci (2005), quando os valores de NSA ficarem negativos é um indicativo de que o modelo apresenta resultados piores que simplesmente repetir o valor observado no tempo t .

Com relação ao quantil 0,95 dos erros absolutos (EA (0,95)), Pedrollo (2005) apud Moreira (2016) comenta que ao invés de utilizar somente as estatísticas tradicionais, anteriormente citadas, pode ser interessante também empregar quantis associados a frequências pré-definidas para a avaliação da qualidade dos resultados de um modelo de previsão. Pois, visualiza-se com frequência, que há grandes erros em uma ou mais previsões de níveis, sobretudo nos extremos, mesmo quando as estatísticas médias ou o NS apresentam valores satisfatórios. De acordo com o autor, para a análise de inundações, que não superam mais do que algumas semanas num período de um ano, os erros das previsões se encontram normalmente associados a frequências de não excedência, iguais ou superiores a 0,90. Na Figura 16 são apresentados o E0,99, E0,95 e E0,90, que representam de forma respectiva, os valores que não foram excedidos pelos erros com frequência de 0,99, 0,95 e 0,90.

Figura 16 – Erros e frequências de não excedência



Fonte: Moreira (2016).

Segundo Moreira (2016), o E0,95, por exemplo, corresponde ao erro que não foi ultrapassado numa proporção de 0,95 da amostragem utilizada. Ou, ainda, pode-se interpretar este quantil como sendo o erro que foi igualado ou ultrapassado com proporção de 5% das amostras. Este parâmetro tem grande importância para a explicação do modelo, pois apresenta qual será a precisão esperada durante a sua aplicação.

No presente estudo foi aplicado o quantil EA (0,95), o qual considera os erros absolutos dos modelos. Esta medida de desempenho foi definida a partir do ajuste da função inversa da distribuição normal na planilha ExcelTM, por meio da função “INV.NORM”, com o cálculo da média e do desvio padrão dos erros absolutos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões acerca do presente estudo, baseando-se nos procedimentos metodológicos apresentados no capítulo anterior.

5.1 Organização e consistência dos dados hidrometeorológicos

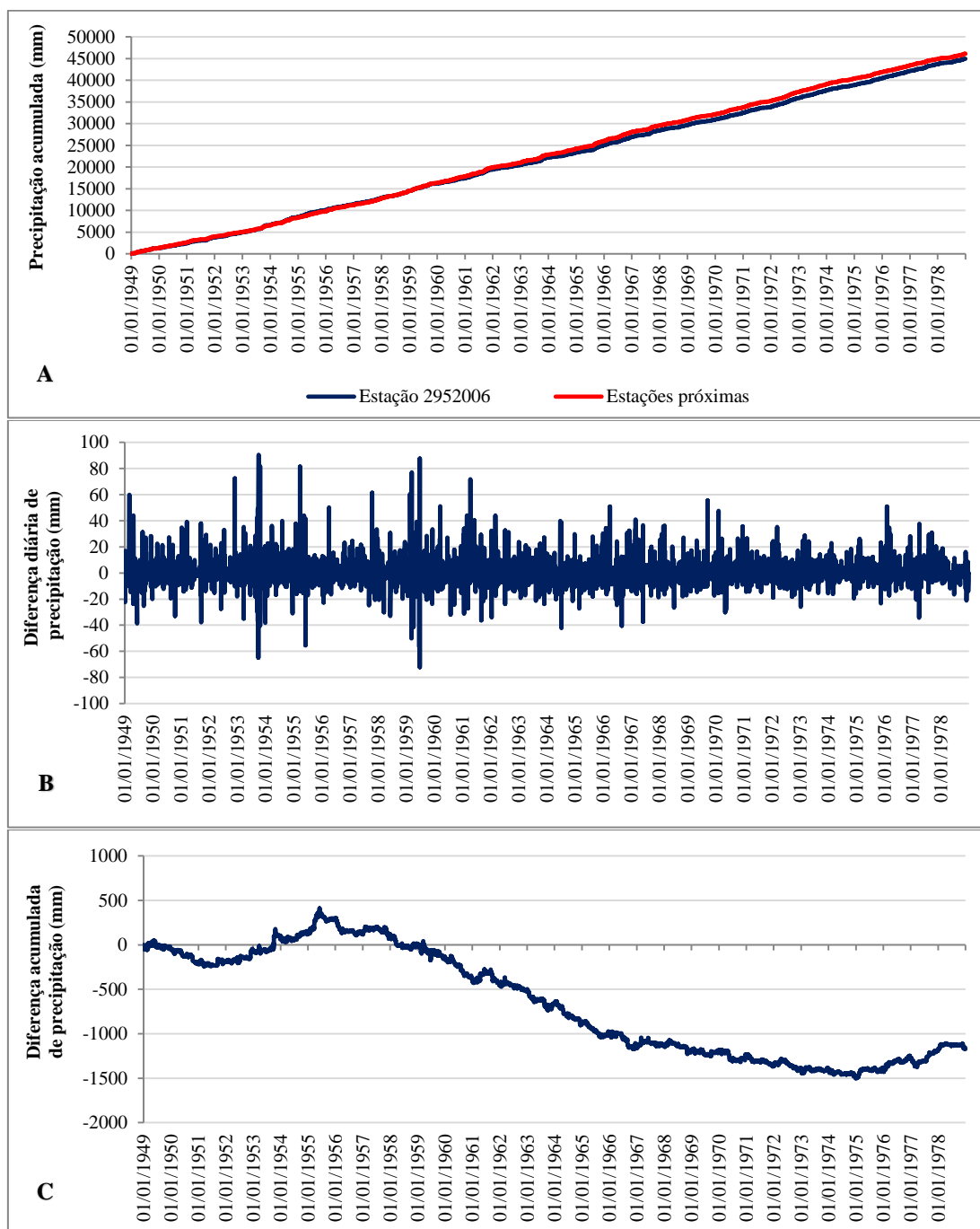
5.1.1 Dados pluviométricos

A partir da metodologia apresentada no Subcapítulo 4.3.1, verificou-se que das 82 estações pluviométricas selecionadas, 28 apresentavam dados diários brutos num intervalo superior a 10 anos, para as quais foi realizada a análise de consistência. Nas Figuras 17 e 18 podem ser contempladas as análises das estações 2952006 e 2852028, respectivamente. Visualizando a Figura 17 (A), nota-se que a estação 2952006 e as estações vizinhas apresentam um comportamento similar até por volta do ano de 1960. E, após este ano, a precipitação média acumulada das estações próximas passa a ser gradativamente superior.

Analizando a Figura 17 (B), verifica-se a presença de picos positivos e negativos ao longo de todo período de análise, não indicando nenhuma tendência de comportamento da precipitação. Há alguns picos isolados ou mais acentuados em uma das séries, mas, ao avaliá-los individualmente, verificou-se que são decorrentes da variação espacial ou temporal da precipitação. O pico de 50,76 mm registrado no dia 02/02/1976 na estação 2952006, por exemplo, provavelmente é resultado de precipitação do tipo convectiva, que ocorre de forma localizada. Contudo, a inexistência de imagens de satélite junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) impede a plena confirmação desta informação. Já o

pico de 08/07/1964 nas estações vizinhas é decorrente da variabilidade temporal das precipitações, pois, no dia seguinte é registrado um pico de 38,57 mm na estação 2952006.

Figura 17 – Análise de consistência da estação 2952006 em relação às estações próximas, considerando a precipitação acumulada no tempo (A), a diferença diária de precipitação (B) e a diferença acumulada de precipitação (C)

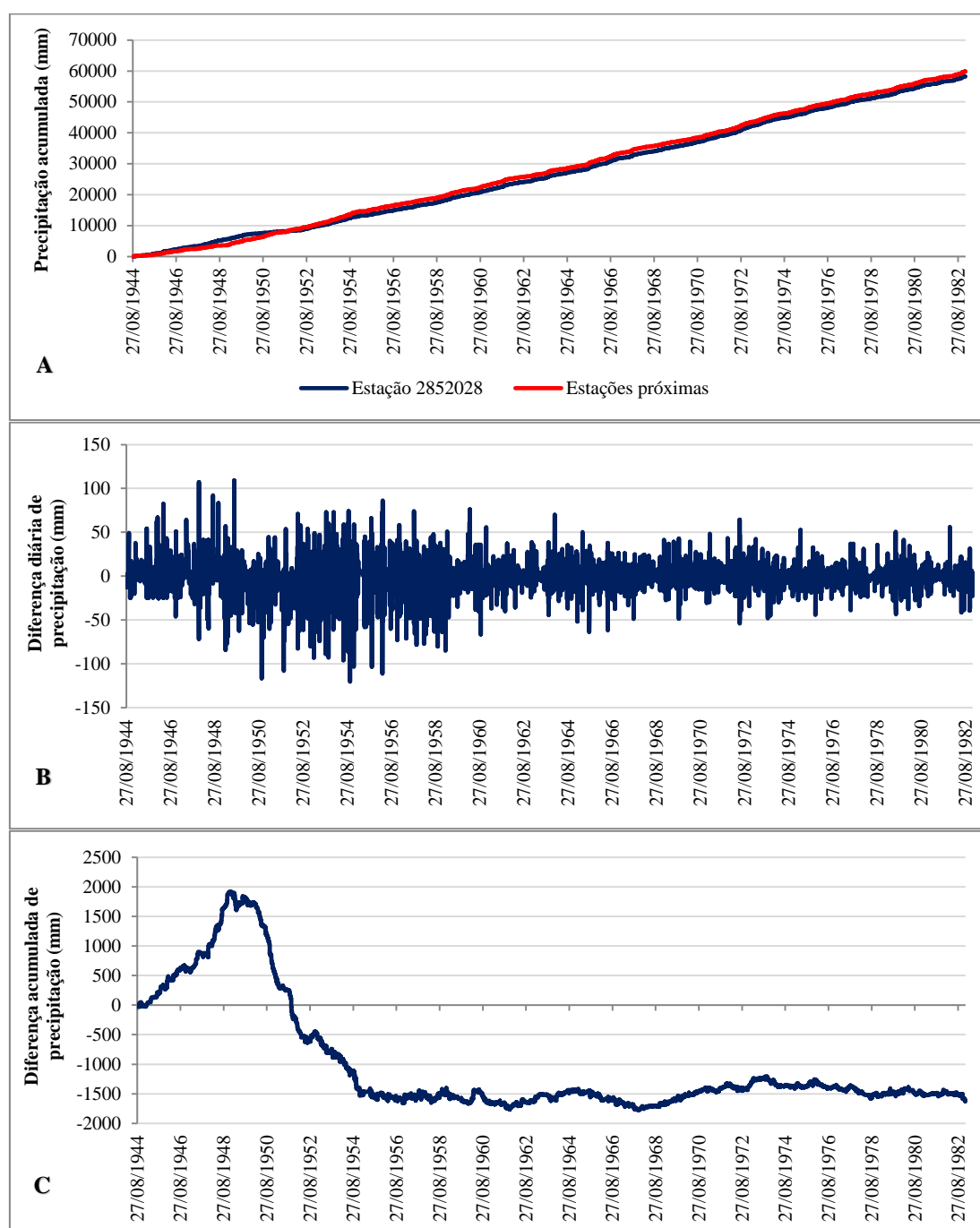


Fonte: Da autora (2017).

Observando a Figura 17 (C), percebe-se o comportamento variável da precipitação, com oscilações suaves e gradativas, reforçando que não há um comportamento tendencioso nas chuvas. O maior acumulado ao longo do tempo das precipitações nas estações vizinhas, que

não ultrapassou 1500 milímetros (mm) num intervalo de 18 anos, pode ser resultado de mudanças no regime de precipitações no ponto em análise, ou proveniente de erros sistemáticos da aferição ou troca de equipamentos. Com base nessas observações, a estação 2952006 foi considerada como consistida, apesar do período posterior a 1960 apresentar incerteza quanto à consistência dos dados.

Figura 18 – Análise de consistência da estação 2852028 em relação às estações próximas, considerando a precipitação acumulada no tempo (A), a diferença diária de precipitação (B) e a diferença acumulada de precipitação (C)



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 2 – Resultados da análise de consistência das estações pluviométricas com dados brutos num período superior a 10 anos

Estação pluviométrica	Número de estações próximas	Disponibilidade de dados/período	Resultados da análise de consistência
2952006	13	01/01/1949 - 31/12/1978	Consistida
2852003	6	01/07/1948 - 31/12/1978	Período descartado: 01/07/1948 a 30/09/1950
2852017	6	22/03/1952 - 31/12/1978	Consistida
2952002	2	01/07/1948 - 31/12/1978	Consistida
2951003	17	01/09/1935 - 31/12/1998	Consistida
2951007	10	01/04/1952 - 31/12/1966	Consistida
2851037	19	01/03/1951 - 31/12/1978	Consistida
2851006	15	01/03/1951 - 31/12/1978	Consistida
2852011	3	01/12/1948 - 31/12/1985	Período descartado: 01/07/1985 a 31/12/1985
2951017	9	01/11/1962 - 31/12/2016	Período descartado: 01/01/1977 a 31/03/1980
2951014	6	25/06/1950 - 31/12/1978	Período descartado: 25/06/1950 a 31/12/1960
2851011	13	01/01/1912 - 26/11/1980	Período descartado: 15/08/1944 a 31/12/1950
2851031	12	01/10/1970 - 31/12/1982	Consistida
2852014	9	16/08/1944 - 31/12/2016	Período descartado: 16/08/1944 a 31/12/1950
2852016	3	27/08/1944 - 31/12/2012	Período descartado: 27/08/1944 a 31/12/1954
2852028	2	01/06/1942 - 31/12/1982	Período descartado: 01/06/1942 a 31/12/1954
2852031	5	03/05/1959 - 31/12/2016	Período descartado: 01/05/2016 a 31/12/2016
2952007	11	01/01/1949 - 31/12/1978	Períodos descartados: 01/06/1952 a 30/11/1954 e 01/01/1963 a 30/09/1969
2952029	7	01/01/1949 - 31/12/1978	Período descartado: 01/01/1949 a 31/12/1958
2951042	12	01/07/1948 - 30/11/1978	Período descartado: 01/10/1957 a 31/12/1959
2951005	3	30/11/1962 - 31/12/1980	Período descartado: 01/01/1967 a 31/12/1969
2852002	5	01/07/1948 - 31/12/1978	Período descartado: 01/07/1955 a 31/08/1958
2852004	6	03/12/1962 - 31/12/2016	Consistida
2951030	0	01/01/1932 - 31/01/1967	Consistida
2852023	4	10/04/1969 - 31/12/1982	Período descartado: 01/01/1982 a 31/12/1982
2852030	4	01/09/1942 - 31/12/1982	Consistida
2851033	17	01/03/1951 - 31/12/ 1978	Consistida
2851001	9	01/03/1951 - 31/12/1981	Consistida

Fonte: Da autora (2017).

Ao avaliar os resultados da análise de consistência da estação 2852028, nos mesmos padrões da estação anterior, verifica-se na Figura 18 (A) que até o final do ano de 1946 os valores de precipitação ficaram muito próximos nas duas séries de dados. Já, entre o final deste ano até 1951, tem-se um aumento no acumulado de chuva na estação em análise (2852028). E, a partir de 1951, há uma inversão de comportamento dos acumulados de precipitação, passando a ficar superiores nas estações vizinhas, o que se mantém constante até 1982. Analisando a Figura 18 (B), nota-se que entre 1944 e 1954 há uma tendência inicial de picos maiores de chuva na estação 2852028, e na sequência, nas estações próximas. Já, após 1954, os picos se

apresentam mais equilibrados, sendo representados por variações espaciais ou temporais da precipitação.

E, por fim, ao apreciar a Figura 18 (C), nota-se um aclave e declive acentuados nos acumulados de precipitação da estação 2852028, num intervalo de 10 anos, entre 1944 e 1954. Já, a partir de 1955 até 1982, visualiza-se um comportamento constante, com variações suaves dos acumulados de chuva, sendo que apesar das estações vizinhas apresentarem um valor superior, este não passou de 300 mm num período de 28 anos. Com base nestas considerações, julgou-se o intervalo de dados entre 1944 a 1954 como inconsistente, sendo, por isso, descartado da estação em análise. Portanto, a série de chuva da estação 2852028, considerada para o presente estudo, corresponde ao período entre os anos de 1955 e 1982.

Essa análise de consistência minuciosa foi realizada para todas as 28 estações, sendo apresentados na Tabela 2, os períodos considerados consistidos, e os intervalos descartados das séries de algumas estações pluviométricas. Destaca-se que a estação 2951030, por não apresentar estações pluviométricas nas proximidades, foi considerada como consistida.

5.1.2 Dados fluviométricos

As séries históricas de cheia em Lajeado e Encantado, necessárias para a AB1, foram organizadas de forma pareada, verificando-se que em todos os eventos de pico em Lajeado, também houve elevação do nível do rio Taquari em Encantado, demonstrando a consistência destes dados. A série pareada está representada na Tabela 3, havendo 88 eventos de inundações e, 14 eventos de cheia não associados a inundações. Destaca-se que as réguas linimétricas da ANA (HidroWeb) e da CPRM, instaladas no município de Encantado, utilizam o nível de referência 0 (zero) para o registro dos níveis fluviais no rio Taquari. Portanto, também foi empregado este padrão na organização dos níveis de Encantado, sendo que para ajustar os referidos níveis com a cota topográfica referenciada ao nível médio do mar, o valor de 27,77 m deve ser somado aos registros. Além disso, é importante salientar que as cotas de Lajeado constantes neste trabalho, além das apresentadas na série consolidada por Moraes (2015), tiveram descontados 0,70 m, a fim de compatibilizar as informações. Ademais, o símbolo “-“ apresentado na Tabela 3 se refere a falhas no registro dos dados, não sendo possível apontar qual a cota máxima observada no local.

Tabela 3 – Série de cotas máximas registradas nos municípios de Lajeado e Encantado

Data	Lajeado (máximo)	Encantado (máximo)	Data	Lajeado (máximo)	Encantado (máximo)
18/07/1940	25,70	-	25/09/1989	25,20	18,39
06/05/1941	29,22	19,48	01/06/1990	25,94	19,47
18/11/1941*	25,23	10,75	23/09/1990	17,95	9,63
20/05/1942	23,20	12,00	13/10/1990	21,40	13,55
25/06/1944	21,96	10,47	27/12/1991	18,20	10,55
27/01/1946	26,70	17,70	29/05/1992	24,65	18,40
02/08/1948	19,90	10,60	06/07/1992	18,15	9,88
17/10/1950	25,63	16,60	25/09/1992	16,19	7,71
16/09/1953	22,41	13,60	05/06/1993	17,90	8,20
22/09/1954	26,65	18,50	06/07/1993	20,45	13,40
19/05/1955	19,61	10,45	03/07/1994	17,30	10,05
06/04/1956	28,16	19,33	04/08/1997	24,90	18,00
09/09/1957	22,15	13,50	16/10/1997	19,00	10,50
13/06/1958	21,10	12,72	01/11/1997	18,10	10,47
23/06/1959	25,93	16,59	16/08/1998	20,85	13,80
01/09/1960	22,00	12,98	14/10/2000	22,75	15,70
30/09/1961	22,10	13,65	21/07/2001	25,60	18,70
18/10/1963	22,00	10,69	02/10/2001	26,25	19,58
22/08/1965	25,70	18,46	13/06/2002	21,50	14,27
06/08/1966	21,30	11,91	03/07/2002	18,75	10,40
21/09/1967	25,63	17,46	21/02/2003	21,00	15,00
16/03/1971	22,00	10,40	09/07/2003	18,95	10,20
29/08/1972	22,70	14,95	27/10/2003	20,04	11,45
21/09/1972	20,50	11,64	16/12/2003	19,68	10,57
19/09/1973	21,50	12,34	19/05/2005	20,24	12,95
10/06/1974	20,30	-	17/10/2005	22,25	15,29
11/08/1975	19,10	10,35	27/07/2006	19,16	11,04
09/08/1976	21,70	13,94	11/07/2007	23,82	17,87
03/08/1977	20,40	14,03	24/09/2007	25,55	18,65
19/08/1977	23,20	14,91	27/10/2008	25,95	18,90
30/07/1980	20,38	13,80	10/08/2009	20,85	11,57
23/08/1980	21,00	13,75	13/09/2009	23,80	16,90
29/06/1982	24,26	15,64	28/09/2009	21,05	13,22
24/10/1982	22,00	13,56	05/01/2010	23,25	12,40
12/11/1982	20,50	12,40	23/09/2010	20,85	13,30
03/05/1983	19,75	11,65	27/03/2011	18,80	11,35
07/07/1983	24,05	16,70	21/07/2011	26,15	19,50
02/08/1983	19,56	11,26	10/08/2011	23,96	16,28
18/08/1983	22,14	14,85	20/09/2012	20,55	14,30
09/07/1984	19,75	11,27	25/08/2013	23,13	15,40
10/05/1985	18,25	10,07	06/06/2014	19,19	11,47
13/08/1985	17,02	8,85	29/06/2014	18,21	9,08
31/05/1986	16,60	8,30	30/09/2014	16,32	9,18
11/10/1986	18,90	10,25	20/10/2014	19,79	11,32
15/05/1987	18,95	11,55	15/07/2015	20,65	13,29
30/07/1987	20,65	11,53	21/07/2015	17,17	9,02
15/08/1987	18,95	11,36	21/09/2015	21,40	12,76
14/09/1988	23,55	16,20	10/10/2015	23,81	15,95
25/09/1988	21,70	11,32	23/10/2015	17,02	9,56
06/07/1989	19,95	12,44	15/07/2016	21,90	15,01
13/09/1989	24,50	18,35	20/10/2016	24,56	17,37

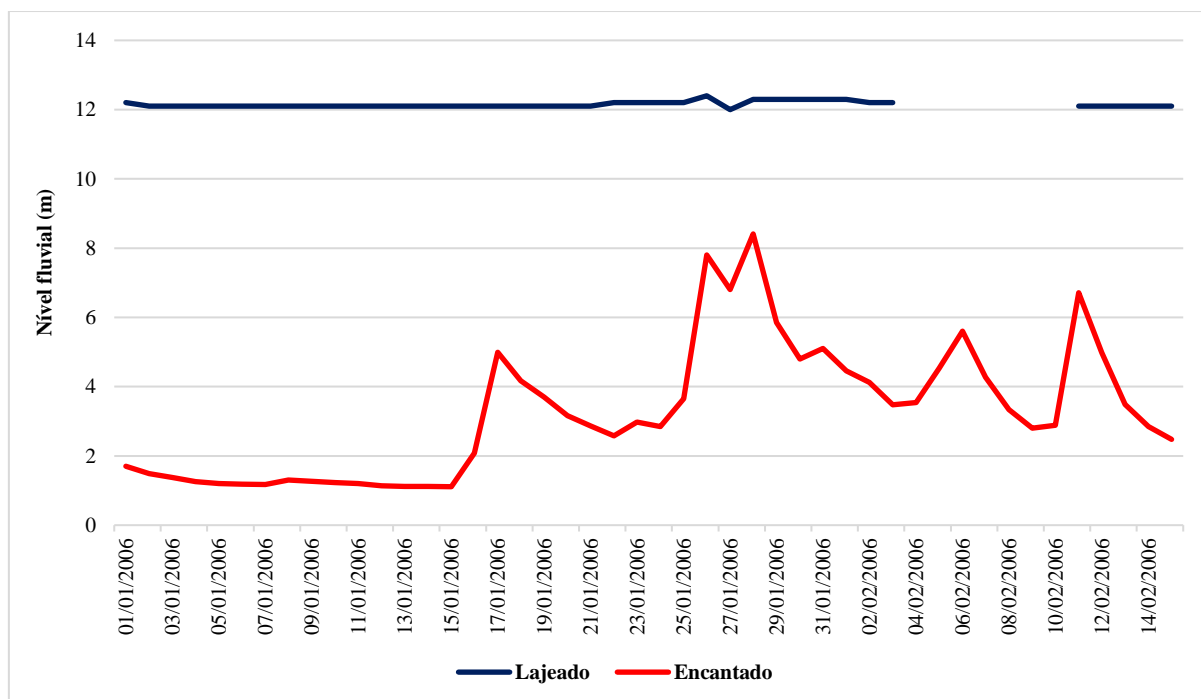
*O evento de inundação de 18/11/1941 foi excluído de todas as análises do presente estudo, visto ter-se evidenciado um *outlier*.

Fonte: Da autora (2017).

As séries com dados horários contínuos de níveis fluviais nos municípios de Encantado e Lajeado necessárias para a AB2, foram organizadas de forma pareada, considerando as informações do Porto Fluvial de Estrela, da AHSUL e da CPRM. Salienta-se, que para compatibilizar as informações, todos os níveis de Encantado foram organizados considerando o nível de referência 0 (zero) e, os níveis fluviais de Lajeado tiveram 0,70 m descontados de seu valor.

Avaliando a consistência da série de dados fluviométricos horários obtida junto ao Porto Fluvial de Estrela e à AHSUL, que apresenta informações entre 15/08/1980 e 31/12/2007, tomando as cotas registradas às 12 h como referência, verificou-se que em alguns períodos há divergência de comportamento nas variações nível em Lajeado em relação à Encantado, como, por exemplo, durante o intervalo de 01/01/2006 a 15/02/2006, representado no Gráfico 2. Nota-se, que o nível fluvial em Encantado oscila significativamente, havendo um pico de elevação no dia 28/01/2006 superior a 8 m acima do nível normal. No entanto, o nível em Lajeado não responde a estas oscilações e se mantém praticamente constante junto ao nível médio do rio. Esse período, assim como outros considerados com informações duvidosas foram excluídos da série pareada para que não prejudiquem o desempenho dos modelos matemáticos.

Gráfico 2 – Comparativo dos dados fluviométricos registrados às 12h nos municípios de Lajeado (jusante) e Encantado (montante), durante o intervalo de 01/01/2006 a 15/02/2006



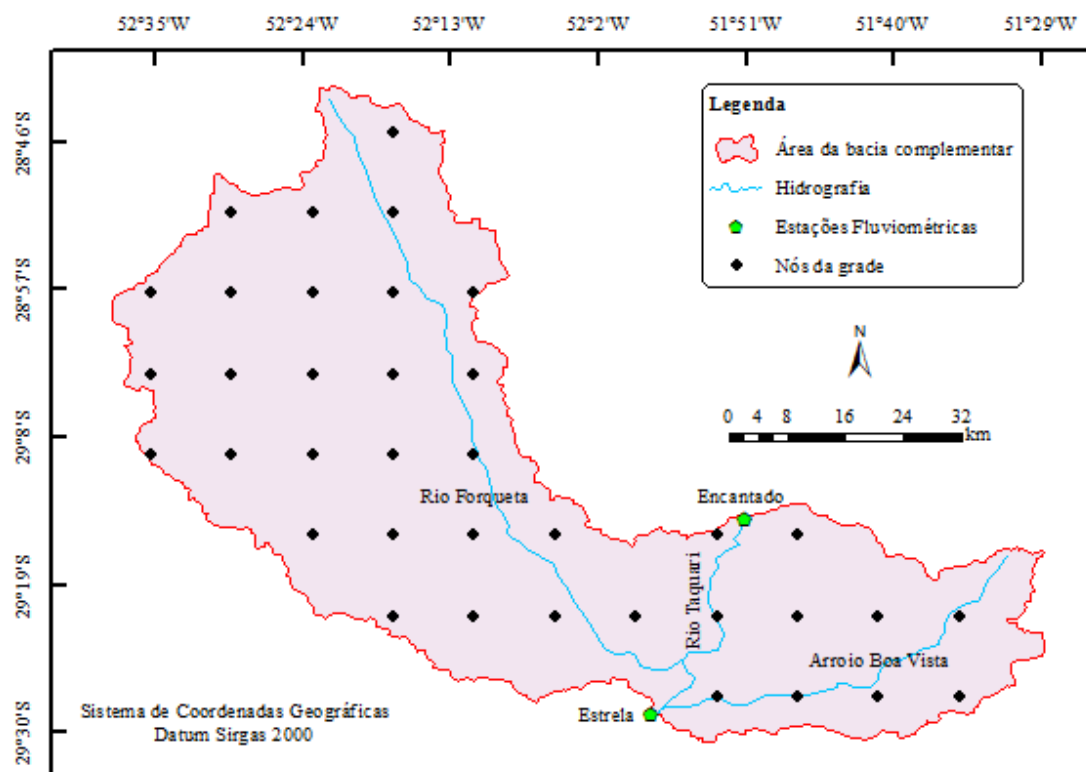
Fonte: Da autora (2017).

Ao verificar a consistência dos dados horários pareados da CPRM, que apresenta informações entre 01/08/2015 e 31/12/2016, não foi identificado nenhum dia com nível duvidoso, sendo excluídas somente as datas sem informações em um ou mais horários. Desta forma, a série pareada considerada na AB2 apresentou dados de nível em Encantado e Lajeado entre os períodos de 15/08/1980 a 31/01/1998 e 01/08/2015 a 31/12/2016, destacando-se que alguns intervalos intermediários foram excluídos por carência de dados ou informações duvidosas, totalizando 5.672 datas com níveis horários.

5.1.3 Ajuste dos dados pluviométricos

A malha regular criada dentro da área de estudo apresentou 37 nós, com equidistância de 10 km, conforme pode ser visualizado na Figura 19. A partir desse resultado e dos métodos apresentados no Subcapítulo 4.3.1.1, foi obtida a precipitação média diária ocorrida na área da bacia complementar desde 1940 até 2016, sem o registro de nenhuma falha.

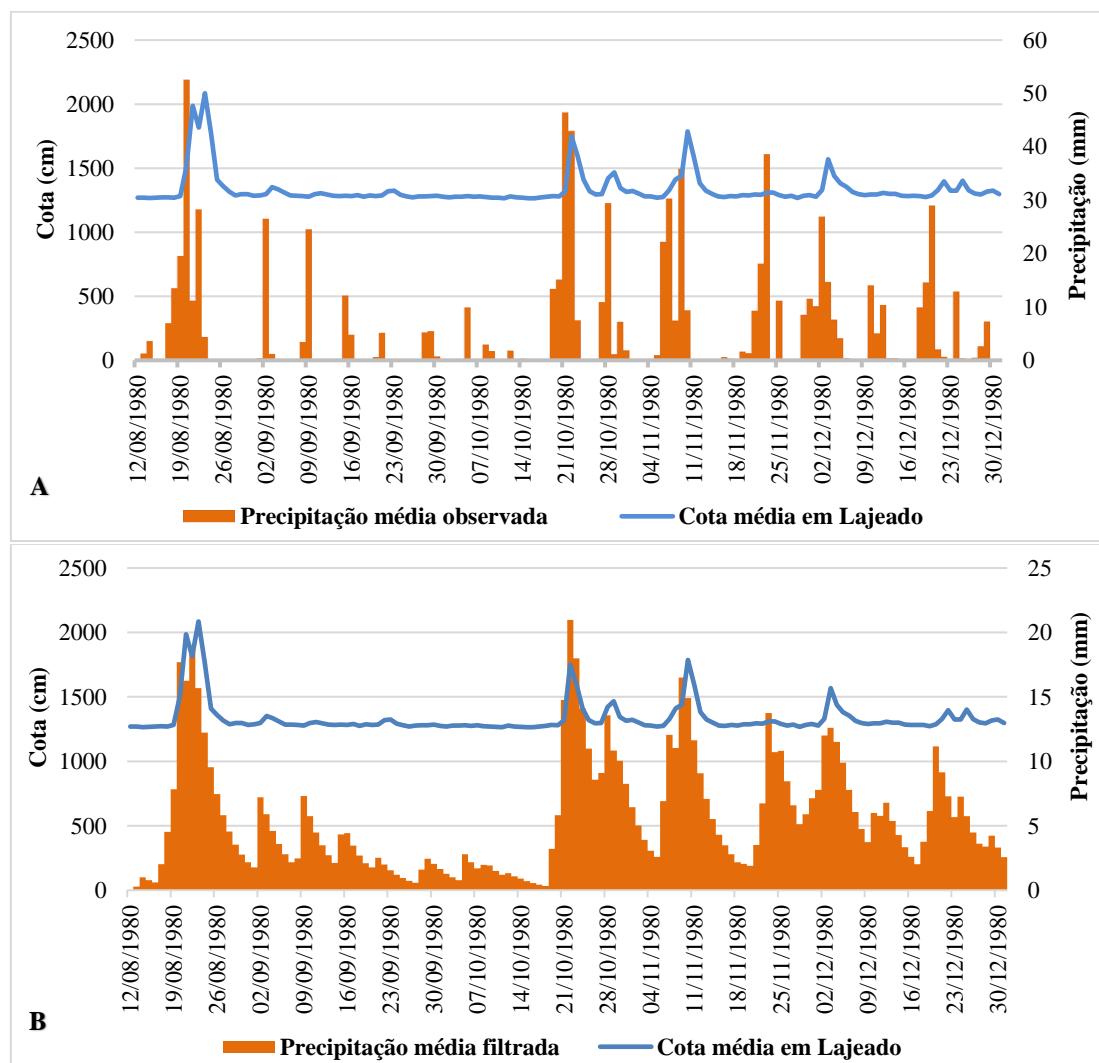
Figura 19 – Grade retangular de interpolação da área de estudo



Fonte: Da autora (2017).

Com base na chuva média diária, foi estabelecida a chuva ocorrida em diferentes dias e acumulada em diferentes intervalos de tempo anteriores à data de interesse, bem como a precipitação com filtros de decaimento exponencial, conforme representado parcialmente no Apêndice C. Destaca-se que o coeficiente α calibrado para a chuva média diária filtrada, empregada na AB1, apresentou valor de 0,78, enquanto que o α calibrado para a precipitação média diária filtrada utilizada na AB2, apresentou valor de 0,55. Na Figura 20, é exemplificado o ajuste da precipitação média diária observada e da precipitação média diária filtrada aos níveis fluviométricos. Visualizando-a, confirma-se o que comentam Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) de que a chuva com filtro de decaimento exponencial se adapta melhor ao fluxo de água observado num corpo hídrico, apresentando maior correlação com as vazões observadas do que as precipitações brutas.

Figura 20 – Ajuste da precipitação média observada (A) e da precipitação média filtrada (B) aos níveis fluviométricos medidos em Lajeado



Fonte: Da autora (2017).

5.2 Calibração dos diferentes modelos matemáticos

No decorrer deste subcapítulo são apresentados os modelos matemáticos para a previsão de níveis fluviais no município de Lajeado, elaborados pelas técnicas de Regressão Múltipla e Redes Neurais Artificiais, considerando as variáveis melhor correlacionadas linearmente ao nível fluvial da cidade de Lajeado.

5.2.1 Análise de correlação linear

5.2.1.1 Modelos baseados em eventos discretos – Abordagem 1

A partir dos dados fluviométricos e pluviométricos manipulados e organizados, montou-se uma tabela pareada com todas as variáveis hidrológicas desde 1941 a 2016, conforme representado no Apêndice D. A análise de correlação linear foi aplicada a 75% desses dados, pois, este foi o percentual de eventos utilizados para a calibração dos modelos matemáticos da AB1, sendo os 25% restantes empregados para a validação da modelagem. As variáveis melhor correlacionadas à cota máxima atingida em Lajeado, entre 1941 e 2005, estão representadas na Tabela 4 (A).

Tabela 4 – Correlação linear de Pearson (R) entre a cota máxima atingida em Lajeado e outras séries de dados hidrológicos durante o período de 1941 a 2005 (A), e durante o período de 1980 a 2009 (B)

(A) Correlação linear de Pearson - R		(B) Correlação linear de Pearson - R	
	Cota Lajeado (máx)		Cota Lajeado (máx)
Cota Encantado (máx)	0,924	Cota Encantado (máx)	0,971
P (t-2)	0,393	P (t-0)	0,337
Pacum 3d	0,548	Pacum 3d	0,612
Pf	0,539	Pf	0,673

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = defasagem temporal em dias; *Pacum 3d* = precipitação média acumulada na bacia complementar 3 dias anteriores à inundação; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtro de decaimento exponencial.

Fonte: Da autora (2017).

Considerando a série de dados a partir de 1941 (TABELA 4 (A)), verifica-se que a correlação linear entre as cotas de Encantado e Lajeado apresentou um valor elevado (0,924), indicando que este é um importante dado de entrada para a elaboração do modelo matemático, justamente por estar localizado a montante da estação de interesse. Com relação às chuvas

anteriores ao evento de inundação em Lajeado, nota-se que a de maior correlação se refere à ocorrida em dois dias antecedentes (t-2), sendo seu R regular (0,393). Referente à precipitação acumulada em diferentes intervalos de dias anteriores, tem-se que a melhor correlacionada corresponde a 3 dias, com R mediano de 0,548. Esta informação condiz com o tempo de concentração junto à área da bacia complementar, que corresponde a 3 dias (KUREK, 2016). A precipitação com filtro de decaimento exponencial apresentou resultados similares, com R igual a 0,539.

Baseando-se nos valores de correlação anteriormente apresentados, tem-se que o grau de linearidade da estação fluviométrica de Encantado é superior aos diferentes dados de precipitação, visto estar mais próximo de 1. No entanto, os dados de chuva não devem ser simplesmente desconsiderados, pois, o uso conjunto destas informações pode apresentar bons resultados, já que permitem representar a contribuição de água da bacia complementar. Além disso, diagnosticou-se que apesar do valor de R junto às estações fluviométricas de montante e jusante ser elevado, elas poderiam estar melhor correlacionadas. Por conta disso, optou-se por realizar uma nova análise de correlação considerando somente dados mais atualizados, a partir de 1980, tal como fez Kurek (2016), visto que neste período mais atual os níveis de inundação em Lajeado correspondem a leituras linimétricas e não a registros históricos, o que lhes confere maior confiabilidade.

Considerando estes dados mais atualizados (TABELA 4 (B)), tem-se uma melhora na correlação linear entre as cotas de montante e jusante, com R de 0,971. Avaliando os dados de precipitação em diferentes escalas temporais anteriores à cheia em Lajeado, verifica-se que o maior R é representado pela chuva ocorrida no mesmo dia do registro do evento hidrológico extremo (0,337), diferente do encontrado na análise da série anterior (1941-2005). Ao considerar as chuvas acumuladas, mantém-se a de 3 dias com R mais elevado (0,612), sendo importante enfatizar que seu valor é superior ao encontrado na série anterior. O mesmo ocorre com a chuva filtrada, que passou a apresentar R igual a 0,673. Estes valores mais elevados de correlação podem estar relacionados ao maior número de estações pluviométricas instaladas na atualidade e aos dados mais precisos e confiáveis de chuva e nível.

A partir destes resultados, optou-se por elaborar modelos matemáticos considerando as duas séries de dados anteriormente apresentadas. Pois, apesar da série a partir de 1980 ser mais recente e precisa, ela não apresenta eventos extremos de inundação (acima de 28 m) em Lajeado.

5.2.1.2 Modelos baseados em séries horárias contínuas - Abordagem 2

Com base nos dados fluviométricos e pluviométricos manipulados e organizados nas etapas anteriores, foi montada uma tabela pareada com todas as variáveis horárias de níveis e diárias de precipitação, desde 1980 a 2016. A análise de correlação foi aplicada a 80% dos dados de forma aleatória, tomando-se o cuidado de estarem compreendidos dentro desse intervalo, os picos de cada série de dados hidrológicos. Na Tabela 5, estão representadas as variáveis melhor correlacionadas à previsão de níveis em Lajeado 6 h à frente, tomando as 6 h da manhã como referência.

Tabela 5 – Correlação linear de Pearson (R) entre a cotas atingidas em Lajeado 6 h à frente (t+6), e outras séries de dados hidrológicos

Correlação linear de Pearson - R	
	Nj (t+6)
Nm (t0)	0,883
Nj (t0)	0,961
P (t-1)	0,607
Pacum 3d	0,654
Pf	0,698

Em que: $Nm(t0)$ e $Nj(t0)$ = níveis fluviais observados às 6 h nas cidades de Encantado e Lajeado, respectivamente; $P(t-1)$ = precipitação média na bacia complementar no dia anterior ao momento de previsão; $Pacum\ 3d$ = precipitação média acumulada na bacia complementar 3 dias anteriores ao momento de previsão; Pf = precipitação na bacia complementar, com filtro de decaimento exponencial; $Nj(t+6)$ = nível fluvial observado em Lajeado ao meio-dia, ou seja, 6 h à frente.

Fonte: Da autora (2017).

Visualizando os resultados apresentados na Tabela 5, verifica-se que o maior grau de linearidade com a cota registrada em Lajeado no horizonte (t+6) é representado pelas cotas observadas em Encantado (0,883) e Lajeado (0,961) às 6 h da manhã (t0), uma vez que apresentam valores de R elevados e próximos de 1. Com relação às chuvas anteriores ao momento da realização da previsão (t0), tem-se a maior correlação retratada pela precipitação ocorrida no dia anterior, com R mediano de 0,607. Referente à precipitação acumulada em diferentes intervalos de dias anteriores ao (t0), nota-se que a melhor correlacionada corresponde a 3 dias, com R relativamente satisfatório de 0,654. E, para a precipitação com filtro de decaimento exponencial, tem-se o R mais satisfatório (0,698), demonstrando ser a variável de chuva melhor correlacionada linearmente aos níveis fluviais em Lajeado no horizonte de previsão (t+6).

A partir destes resultados, destaca-se, novamente, que apesar das cotas registradas em Lajeado e Encantado (t0) estarem melhor correlacionadas ao nível fluvial em Lajeado no

horizonte de 6 h à frente, os demais dados de precipitação não devem ser desconsiderados, uma vez que o emprego conjunto destas variáveis pode implicar em bons resultados.

5.2.2 Ajuste dos modelos com regressão múltipla

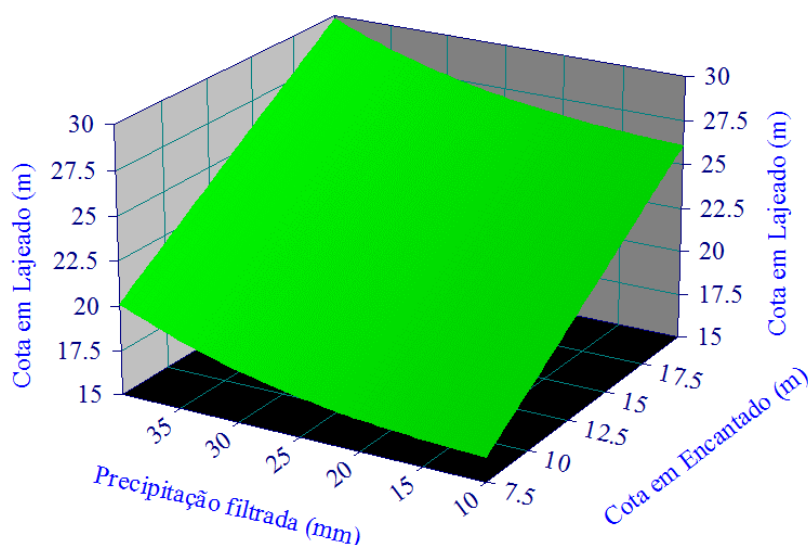
5.2.2.1 Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1941) – Abordagem 1

Considerando a análise de correlação anteriormente apresentada, foram testados todos os possíveis pares de dados de entrada, visto que o *software* TableCurve 3D V 4.0 permite somente o emprego de duas variáveis independentes para as equações pré-definidas. A função que apresentou as melhores medidas de desempenho durante a calibração e validação dos modelos, que consideraram os dados desde 1941, foi obtida a partir do emprego das variáveis independentes de “Cota Encantado (máx) + Pf”, estando representada pela Equação 19, e também pela Figura 21.

$$z = 10,4927055 + 0,776838903x + 0,00005964y^3 \quad (19)$$

Em que: z = cota prevista para Lajeado; x = cota máxima em Encantado; y = precipitação com filtro de decaimento exponencial.

Figura 21 – Superfície ajustada para a previsão de nível fluvial em Lajeado, a partir da cota máxima observada em Encantado e da chuva filtrada na bacia complementar (MOD_1941)



As medidas de desempenho do modelo calibrado a partir da série de dados desde 1941 (MOD_1941) são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Medidas de desempenho dos modelos baseados em eventos discretos

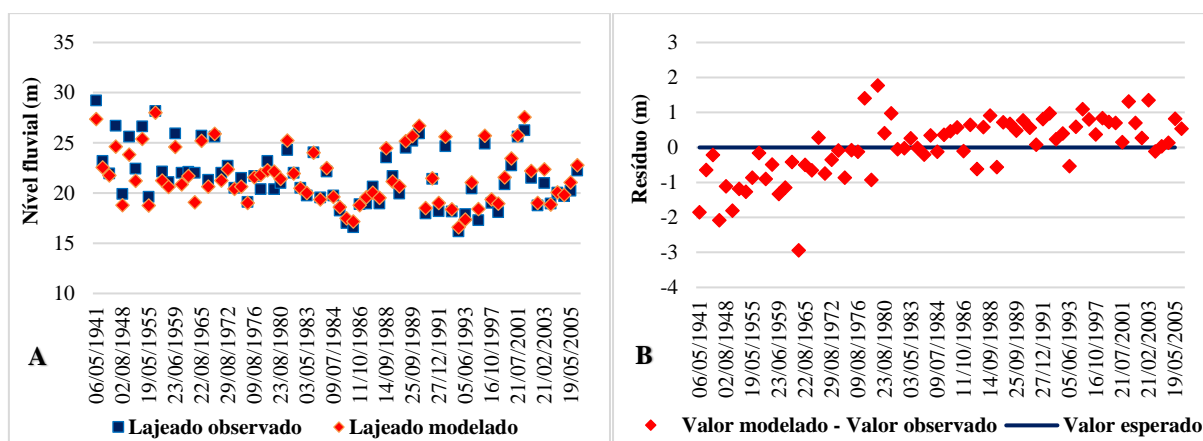
Medidas de desempenho	MOD_1941		MOD_1980	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
EAM (m)	0,679	0,739	0,329	0,484
EPM (%)	3,098	3,498	1,599	2,434
RMSE (m)	0,865	0,888	0,429	0,607
EA95 (m)	1,567	1,565	0,786	1,106
NS	0,908	0,899	0,974	0,951
R²	0,908	0,963	0,974	0,956
EP (m)	-	-	0,059	0,146
EQM (m²)	-	-	0,184	0,369

Em que: *EAM* = erro absoluto médio; *EPM* = erro proporcional médio; *RMSE* = raiz do erro quadrático médio; *EA95* = quantil 0,95 dos erros absolutos; *NS* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *R²* = coeficiente de determinação; *EP* = erro padrão; *EQM* = erro quadrático médio.

Fonte: Da autora (2017).

Observa-se, na Tabela 6, que o coeficiente de determinação (R^2) da regressão empregada para a calibração do MOD_1941 foi de 0,908, indicando que há um bom ajuste do modelo ao conjunto de dados disponíveis, o que também pode ser visualizado na Figura 22 (A), em que se constata que na maioria dos eventos não há grande divergência entre as cotas registradas e previstas. É importante destacar que as maiores diferenças entre a cota observada e modelada para Lajeado condizem com os eventos mais antigos, entre 1941 e 1980, provavelmente por neste período não existir uma fonte de dados tão confiável como na atualidade, podendo haver divergências entre as cotas e precipitações realmente ocorridas e as registradas.

Figura 22 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado (A) e os resíduos da modelagem dos níveis fluviais (B), durante a calibração do MOD_1941



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 7 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a calibração do MOD_1941

Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)	Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)
06/05/1941	29,22	27,36	-1,86	10/05/1985	18,25	18,61	0,36
20/05/1942	23,20	22,55	-0,65	13/08/1985	17,02	17,49	0,47
25/06/1944	21,96	21,74	-0,22	31/05/1986	16,60	17,17	0,57
27/01/1946	26,70	24,62	-2,08	11/10/1986	18,90	18,79	-0,11
02/08/1948	19,90	18,79	-1,11	15/05/1987	18,95	19,59	0,64
17/10/1950	25,63	23,83	-1,80	30/07/1987	20,65	20,03	-0,62
16/09/1953	22,41	21,22	-1,19	15/08/1987	18,95	19,53	0,58
22/09/1954	26,65	25,39	-1,26	14/09/1988	23,55	24,46	0,91
19/05/1955	19,61	18,75	-0,86	25/09/1988	21,70	21,13	-0,57
06/04/1956	28,16	28,00	-0,16	06/07/1989	19,95	20,67	0,72
09/09/1957	22,15	21,25	-0,90	13/09/1989	24,50	25,17	0,67
13/06/1958	21,10	20,62	-0,48	25/09/1989	25,20	25,68	0,48
23/06/1959	25,93	24,60	-1,33	01/06/1990	25,94	26,71	0,77
01/09/1960	22,00	20,85	-1,15	23/09/1990	17,95	18,52	0,57
30/09/1961	22,10	21,68	-0,42	13/10/1990	21,40	21,48	0,08
18/10/1963	22,00	19,06	-2,94	27/12/1991	18,20	19,01	0,81
22/08/1965	25,70	25,20	-0,50	29/05/1992	24,65	25,62	0,97
06/08/1966	21,30	20,64	-0,66	06/07/1992	18,15	18,38	0,23
21/09/1967	25,63	25,91	0,28	25/09/1992	16,19	16,59	0,40
16/03/1971	22,00	21,25	-0,75	05/06/1993	17,90	17,36	-0,54
29/08/1972	22,70	22,35	-0,35	06/07/1993	20,45	21,04	0,59
21/09/1972	20,50	20,41	-0,09	03/07/1994	17,30	18,39	1,09
19/09/1973	21,50	20,63	-0,87	04/08/1997	24,90	25,70	0,80
11/08/1975	19,10	19,02	-0,08	16/10/1997	19,00	19,37	0,37
09/08/1976	21,70	21,58	-0,12	01/11/1997	18,10	18,94	0,84
03/08/1977	20,40	21,81	1,41	16/08/1998	20,85	21,58	0,73
19/08/1977	23,20	22,27	-0,93	14/10/2000	22,75	23,45	0,70
30/07/1980	20,38	22,15	1,77	21/07/2001	25,60	25,75	0,15
23/08/1980	21,00	21,41	0,41	02/10/2001	26,25	27,57	1,32
29/06/1982	24,26	25,23	0,97	13/06/2002	21,50	22,20	0,70
24/10/1982	22,00	21,95	-0,05	03/07/2002	18,75	19,02	0,27
12/11/1982	20,50	20,48	-0,02	21/02/2003	21,00	22,35	1,35
03/05/1983	19,75	20,01	0,26	09/07/2003	18,95	18,84	-0,11
07/07/1983	24,05	24,04	-0,01	27/10/2003	20,04	20,08	0,04
02/08/1983	19,56	19,35	-0,21	16/12/2003	19,68	19,81	0,13
18/08/1983	22,14	22,48	0,34	19/05/2005	20,24	21,06	0,82
09/07/1984	19,75	19,62	-0,13	17/10/2005	22,25	22,79	0,54

Fonte: Da autora (2017).

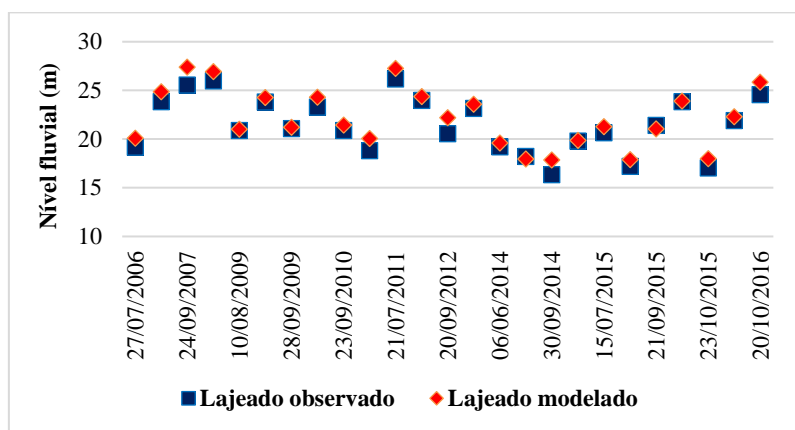
O EAM foi de 0,68 m e o EA95, de 1,57 m, destacando-se que 52 eventos (70%), conforme pode ser visualizado na Figura 22 (B) e na Tabela 7, apresentaram resíduo inferior a 0,80 m na previsão da cota para Lajeado. Dos eventos que ultrapassaram este limiar, apenas dois obtiveram erro superior a 2 m, sendo relativos às inundações ocorridas em 27/01/1946 (-2,08 m) e 18/10/1963 (-2,94 m). A primeira data corresponde a uma cheia de grande magnitude, e, a segunda, de pequena proporção, sendo ambas relacionadas a registros históricos, anteriores

a 1980. Ainda partir da Figura 22 (B) e da Tabela 7, percebe-se que o modelo apresentou uma tendência de subestimar as cotas históricas, e de superestimar as cotas registradas por réguas linimétricas e sensores automáticos a partir do ano de 1980. Isso, provavelmente, é decorrente do emprego de duas fontes de dados com diferentes formas de aferição.

Comparando os resultados obtidos durante a calibração à Eckhardt (2008), tem-se no presente estudo maiores R^2 (0,900) e NS (0,900), e menor EAM (0,998 m), o que permite inferir que o modelo proposto com o uso conjunto da cota máxima de Encantado e a chuva filtrada na bacia complementar apresenta resultados mais fidedignos, do que somente empregando a primeira variável.

O bom desempenho do modelo pode ser confirmado com a amostra de validação, que apresentou um R^2 de 0,963 e NS de 0,899, demonstrando que a equação calibrada obteve um bom ajuste e eficiência satisfatória perante aos dados separados para validar o modelo (GRÁFICO 3). O maior R^2 encontrado para a amostra de validação, provavelmente é decorrente deste conjunto de informações ser mais atual, preciso e confiável.

Gráfico 3 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_1941



Fonte: Da autora (2017).

O EAM da amostra de validação foi de 0,74 m e o EA95 se manteve em 1,57 m, sendo que a maior divergência entre os dados registrados e modelados corresponde ao evento de 24/09/2007, com 1,83 m de diferença. Ainda a partir dos resíduos provenientes da modelagem (TABELA 8), nota-se a maior tendência do modelo em superestimar as cotas em Lajeado no período mais atual. No entanto, é importante destacar que de 25 eventos utilizados na validação do modelo, em apenas três, o erro foi superior a 1,5 m, sendo nas datas de 24/09/2007 (1,83 m), 20/09/2012 (1,62 m) e 30/09/2014 (1,52 m), que correspondem, respectivamente, a eventos de

grande e pequena magnitude, e não associado à inundação. Considerando esses resultados, tem-se que o modelo matemático apresenta boa eficiência para a previsão de níveis na cidade de Lajeado.

Tabela 8 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_1941

Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)	Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)
27/07/2006	19,16	20,06	0,90	25/08/2013	23,13	23,55	0,42
11/07/2007	23,82	24,85	1,03	06/06/2014	19,19	19,59	0,40
24/09/2007	25,55	27,38	1,83	29/06/2014	18,21	17,93	-0,28
27/10/2008	25,95	26,90	0,95	30/09/2014	16,32	17,84	1,52
10/08/2009	20,85	21,01	0,16	20/10/2014	19,79	19,86	0,07
13/09/2009	23,8	24,24	0,44	15/07/2015	20,65	21,27	0,62
28/09/2009	21,05	21,20	0,15	21/07/2015	17,17	17,87	0,70
05/01/2010	23,25	24,27	1,02	21/09/2015	21,4	21,03	-0,37
23/09/2010	20,85	21,42	0,57	10/10/2015	23,81	23,89	0,08
27/03/2011	18,8	20,04	1,24	23/10/2015	17,02	17,98	0,96
21/07/2011	26,15	27,24	1,09	15/07/2016	21,9	22,27	0,37
10/08/2011	23,96	24,36	0,40	20/10/2016	24,56	25,85	1,29
20/09/2012	20,55	22,17	1,62	-----			

Fonte: Da autora (2017).

5.2.2.2 Modelo baseado em eventos discretos (MOD_1980) – Abordagem 1

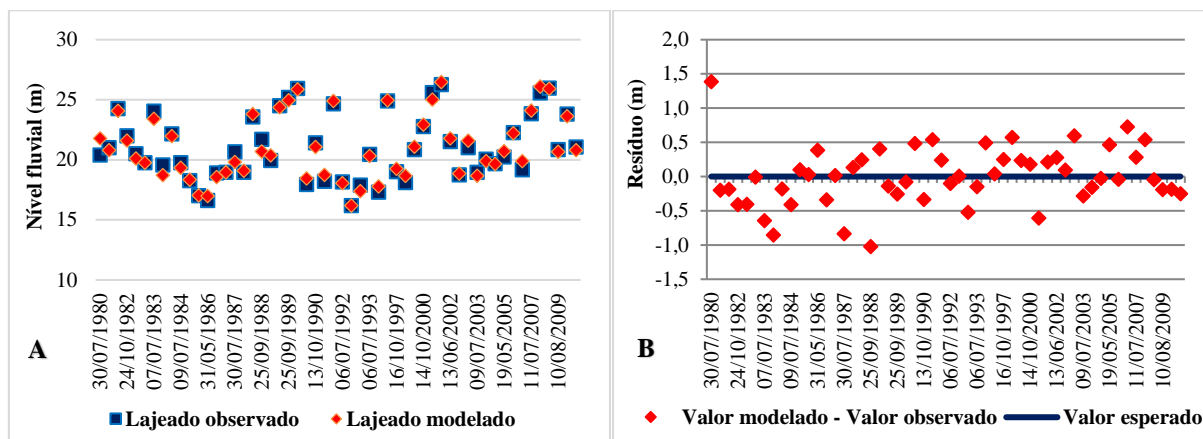
Para a série de dados atualizados foram considerados os mesmos pares de dados de variáveis independentes da série anterior, sendo os melhores resultados obtidos durante a calibração e validação dos modelos com o emprego da “Cota Encantado (máx) + Pf”. A função ajustada pelo TableCurve 3D V 4.0 é apresentada na Equação 20.

$$z = 9,5957717 + 0,6986821x + 0,10102118y \quad (20)$$

Em que: z = cota prevista para Lajeado; x = cota máxima em Encantado; y = precipitação com filtro de decaimento exponencial.

O R^2 obtido na calibração da regressão adotada na modelagem da série de inundações em Lajeado desde 1980 foi de 0,974, indicando haver um ajuste melhor entre estes dados, se comparado à situação anterior, o que também pode ser observado na Figura 23 (A). Além disso, este valor aponta que as variáveis de entrada empregadas explicam mais de 97 % da cota observada em Lajeado, o que é um percentual muito satisfatório.

Figura 23 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado (A) e os resíduos da modelagem dos níveis fluviais (B), durante a calibração do MOD_1980



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 9 – Cotas observadas e modeladas para Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a calibração do MOD_1980

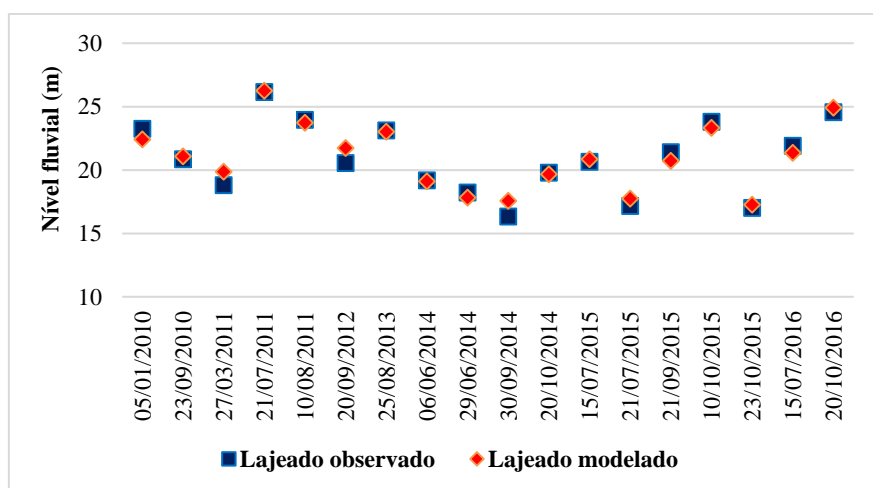
Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)	Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)
30/07/1980	20,38	21,77	1,39	06/07/1992	18,15	18,05	-0,10
23/08/1980	21,00	20,80	-0,20	25/09/1992	16,19	16,19	0,00
29/06/1982	24,26	24,07	-0,19	05/06/1993	17,90	17,38	-0,52
24/10/1982	22,00	21,59	-0,41	06/07/1993	20,45	20,30	-0,15
12/11/1982	20,50	20,09	-0,41	03/07/1994	17,30	17,79	0,49
03/05/1983	19,75	19,74	-0,01	04/08/1997	24,90	24,94	0,04
07/07/1983	24,05	23,41	-0,64	16/10/1997	19,00	19,25	0,25
02/08/1983	19,56	18,71	-0,85	01/11/1997	18,10	18,67	0,57
18/08/1983	22,14	21,96	-0,18	16/08/1998	20,85	21,09	0,24
09/07/1984	19,75	19,34	-0,41	14/10/2000	22,75	22,93	0,18
10/05/1985	18,25	18,35	0,10	21/07/2001	25,60	24,99	-0,61
13/08/1985	17,02	17,05	0,03	02/10/2001	26,25	26,46	0,21
31/05/1986	16,60	16,99	0,39	13/06/2002	21,50	21,78	0,28
11/10/1986	18,90	18,56	-0,34	03/07/2002	18,75	18,84	0,09
15/05/1987	18,95	18,96	0,01	21/02/2003	21,00	21,59	0,59
30/07/1987	20,65	19,81	-0,84	09/07/2003	18,95	18,66	-0,29
15/08/1987	18,95	19,08	0,13	27/10/2003	20,04	19,88	-0,16
14/09/1988	23,55	23,80	0,25	16/12/2003	19,68	19,65	-0,03
25/09/1988	21,70	20,68	-1,02	19/05/2005	20,24	20,70	0,46
06/07/1989	19,95	20,35	0,40	17/10/2005	22,25	22,21	-0,04
13/09/1989	24,50	24,36	-0,14	27/07/2006	19,16	19,89	0,73
25/09/1989	25,20	24,94	-0,26	11/07/2007	23,82	24,10	0,28
01/06/1990	25,94	25,86	-0,08	24/09/2007	25,55	26,09	0,54
23/09/1990	17,95	18,43	0,48	27/10/2008	25,95	25,90	-0,05
13/10/1990	21,40	21,06	-0,34	10/08/2009	20,85	20,66	-0,19
27/12/1991	18,20	18,74	0,54	13/09/2009	23,80	23,61	-0,19
29/05/1992	24,65	24,89	0,24	28/09/2009	21,05	20,80	-0,25

Fonte: Da autora (2017).

Já, o EAM e o EA95, para este novo conjunto de dados, foi, respectivamente, de 0,33 m e 0,79 m, o que representa cerca da metade dos resíduos obtidos com o MOD_1941. Além disso, segundo a Figura 23 (B) e a Tabela 9, averigua-se que 47 episódios (87%) obtiveram resíduo inferior a 0,60 m na previsão do nível para Lajeado, destacando-se que apenas dois eventos de pequena magnitude apresentaram erro superior a 1 m, sendo referentes às inundações ocorridas em 30/07/1980 (1,39 m) e 25/09/1988 (-1,02 m).

Ao confrontar as medidas de desempenho da calibração (TABELA 6) à Kurek (2016), tem-se no presente estudo maior R^2 (0,948); e; menores Erro quadrático médio (0,281 m²); Erro padrão (0,530 m) e NS (0,999), sendo que de modo geral, tem-se uma considerável melhora na previsão de níveis em Lajeado, ao integrar o uso da cota máxima de Encantado com a chuva filtrada na bacia complementar, em relação aos valores obtidos somente com o emprego das cotas a montante. É importante destacar também que Kurek (2016) não considerou alguns eventos de cheia em nenhuma de suas modelagens, por não haver dados de precipitação suficientes disponíveis para seu estudo, como é o caso da inundação ocorrida em 05/01/2010. Essa inundação fora causada, principalmente, pela contribuição do rio Forqueta, afluente do rio Taquari, que desemboca entre os municípios de Arroio do Meio e Lajeado, visto terem ocorrido chuvas volumosas nesta sub-bacia. Logo, um modelo que considera somente as cotas de montante não possui condições de fornecer um nível preciso neste tipo de situação. Aplicando o modelo de Kurek (2016) na versão modificada a este evento, tem-se um erro de -3,26 m. Já, ao aplicar o modelo proposto no presente estudo, tem-se um erro de somente -0,84 m para esta data, justamente por também considerar a precipitação na bacia complementar.

Gráfico 4 – Ajuste das cotas observadas e modeladas para Lajeado durante a validação do MOD_1980



Fonte: Da autora (2017).

A amostra de validação dos dados recentes reforça o bom desempenho do modelo na previsão de níveis em Lajeado (GRÁFICO 4), com R^2 de 0,956 e NS de 0,951. O EAM e o EA95 obtidos para este conjunto de dados foi, respectivamente, de 0,48 m e 1,11 m, ou seja, também inferiores aos erros encontrados a partir do MOD_1941. Ao visualizar a Tabela 10, nota-se, que em apenas 3 dos 18 eventos, o erro foi um pouco superior a 1 m, sendo nas datas de 27/03/2011 (1,06 m), 20/09/2012 (1,18 m) e, 30/09/2014 (1,25), que correspondem a eventos não associados a inundações, e uma inundação de pequena magnitude. A partir desses resultados, constata-se que este modelo matemático apresenta boa eficiência para a previsão de níveis no município de Lajeado, inclusive para eventos de grande magnitude.

Tabela 10 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_1980

Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)	Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)
05/01/2010	23,25	22,41	-0,84	30/09/2014	16,32	17,57	1,25
23/09/2010	20,85	21,07	0,22	20/10/2014	19,79	19,65	-0,14
27/03/2011	18,80	19,86	1,06	15/07/2015	20,65	20,86	0,21
21/07/2011	26,15	26,24	0,09	21/07/2015	17,17	17,75	0,58
10/08/2011	23,96	23,73	-0,23	21/09/2015	21,40	20,72	-0,68
20/09/2012	20,55	21,73	1,18	10/10/2015	23,81	23,33	-0,48
25/08/2013	23,13	23,02	-0,11	23/10/2015	17,02	17,27	0,25
06/06/2014	19,19	19,10	-0,09	15/07/2016	21,90	21,35	-0,55
29/06/2014	18,21	17,82	-0,39	20/10/2016	24,56	24,91	0,35

Fonte: Da autora (2017).

5.2.2.3 Modelo baseado em séries horárias contínuas para o horizonte de previsão (t+6) (MOD_RM) – Abordagem 2

Para essa abordagem, com horizonte de previsão de 6 h à frente, também foram testadas todas as possíveis configurações de pares de dados de entrada para a calibração dos modelos com o uso de Regressão Múltipla, sendo os melhores resultados obtidos com a função (EQUAÇÃO 21) que empregou as variáveis independentes “Nm (t0) + Nj (t0)”.

$$z = 2,0689373 + 0,0287860x^2 + 2,0573377y(\ln(y))^{-1} \quad (21)$$

Em que: z = cota prevista para Lajeado 6 h à frente; x = cota em Encantado no tempo atual (t0); y = cota em Lajeado no tempo atual (t0).

As medidas de desempenho da amostra de validação do modelo calibrado por regressão múltipla (MOD_RM) para o horizonte de previsão (t+6) estão representadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RM)

Medidas de desempenho	Horizonte de previsão (t+6)
EAM (m)	0,087
EPM (%)	0,658
RMSE (m)	0,175
EA95 (m)	0,336
NS	0,967
NSA	0,965
R²	0,971

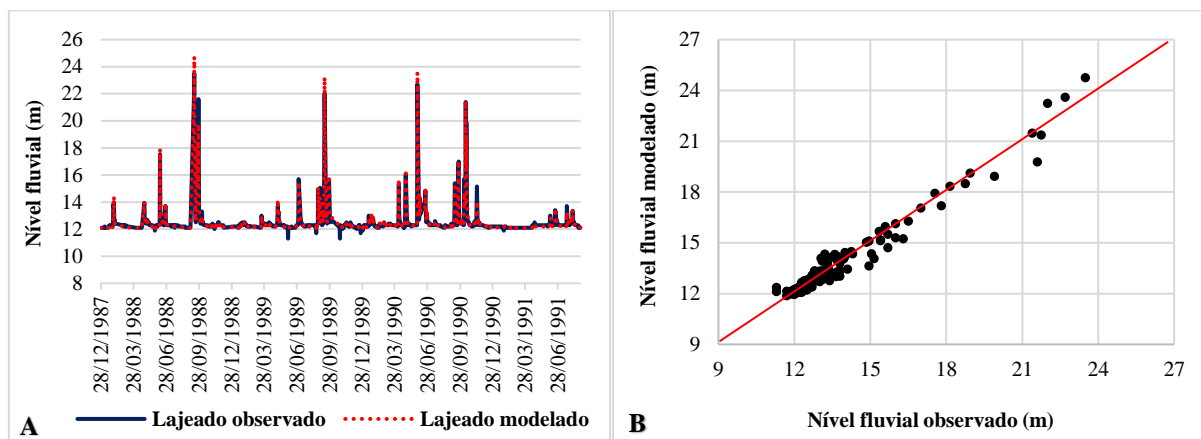
Em que: *EAM* = erro absoluto médio; *EPM* = erro proporcional médio; *RMSE* = raiz do erro quadrático médio; *EA95* = quantil 0,95 dos erros absolutos; *NS* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *NSA* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe Adaptado; *R²* = coeficiente de determinação.

Fonte: Da autora (2017).

Verifica-se, na Tabela 11, que o R^2 do modelo com horizonte de previsão (t+6) foi de 0,971, demonstrando que a equação calibrada se adaptou bem aos dados separados para a validação, conforme representado na Figura 24 (A) e (B). Salienta-se que em virtude da utilização de um conjunto de datas com cotas em torno da normalidade significativamente maior do que com níveis de cheia ou inundação, é normal que o modelo calibrado tenha uma maior facilidade de prever as cotas menores, mas, mesmo perante aos eventos hidrológicos extremos a modelagem foi, de modo geral, satisfatória. Os coeficientes NS (0,967) e NSA (0,965) também comprovam o bom desempenho do modelo na previsão de níveis para Lajeado, segundo comentam Motovilov et al. (1999) e Liew et al. (2007).

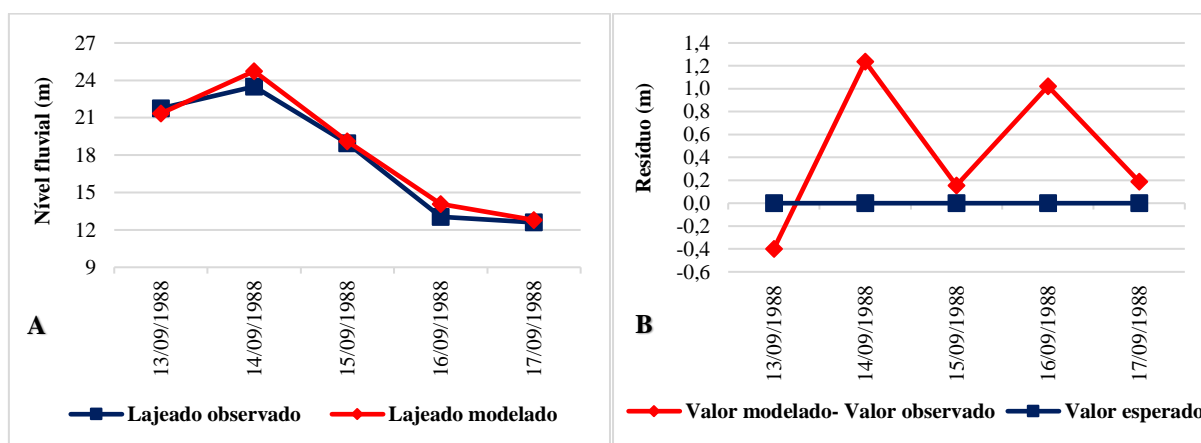
Em relação aos erros, o modelo apresentou baixos índices, com EAM de 0,09 m; EPM de 0,658 %; RMSE de 0,175 m e EA95 de 0,336 m, sendo que apesar destes valores serem insignificantes, a previsão não foi tão boa em algumas datas, a exemplo dos dias 14 e 16/09/1988, em que a cota foi superestimada em 1,24 m e 1,02 m, respectivamente. Mas, é importante destacar que nas previsões dos dias 13 e 15/09/1988, em que o nível do rio Taquari também estava em cota de inundação, os erros foram menos expressivos e inferiores a 0,45 m, conforme pode ser observado na Figura 25 (A) e (B).

Figura 24 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RM



Fonte: Da autora (2017).

Figura 25 – Ajuste (A) e resíduos (B) da modelagem dos níveis fluviais em Lajeado para o período de 13 a 17/09/1988



Fonte: Da autora (2017).

Considerando estes resultados e as análises realizadas, tem-se que o modelo matemático apresenta eficiência satisfatória para a previsão de níveis fluviais na cidade de Lajeado num horizonte de 6 h à frente. Destaca-se, que apesar da precisão para níveis mais elevados ser um pouco menor em alguns momentos, este modelo fornece a informação de um possível cenário de cheia com uma antecipação de 6 h, possibilitando a adoção de medidas de contingência.

5.2.3 Ajuste do modelo com redes neurais artificiais

5.2.3.1 Modelo baseado em séries horárias contínuas para o horizonte de previsão (t+6) (MOD_RNAs) – Abordagem 2

Nessa configuração de abordagem foram empregadas, inicialmente, as 5 variáveis independentes melhor correlacionadas à cota observada em Lajeado (t+6). Após diversos testes, verificou-se que o melhor desempenho foi obtido com a exclusão da variável de entrada de chuva do dia anterior ($P(t-1)$), que apresentava o menor índice de correlação linear, e, com o emprego de 7 neurônios na camada intermediária. Desse modo, a RNA foi composta por 4 neurônios na camada de entrada ($N_m(t_0)$; $N_j(t_0)$; $P_{acum} 3d$; $P_f(t+6)$); 7 neurônios na camada interna, e; 1 neurônio na camada de saída, que corresponde à previsão de nível em Lajeado no horizonte de 6 h.

As medidas de desempenho da amostra de validação do modelo calibrado por Redes Neurais Artificiais (MOD_RNAs) para o horizonte de previsão (t+6) estão representadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RNAs)

Medidas de desempenho	Horizonte de previsão (t+ 6)
EAM (m)	0,066
EPM (%)	0,505
RMSE (m)	0,138
EA95 (m)	0,266
NS	0,980
NSA	0,978
R²	0,980

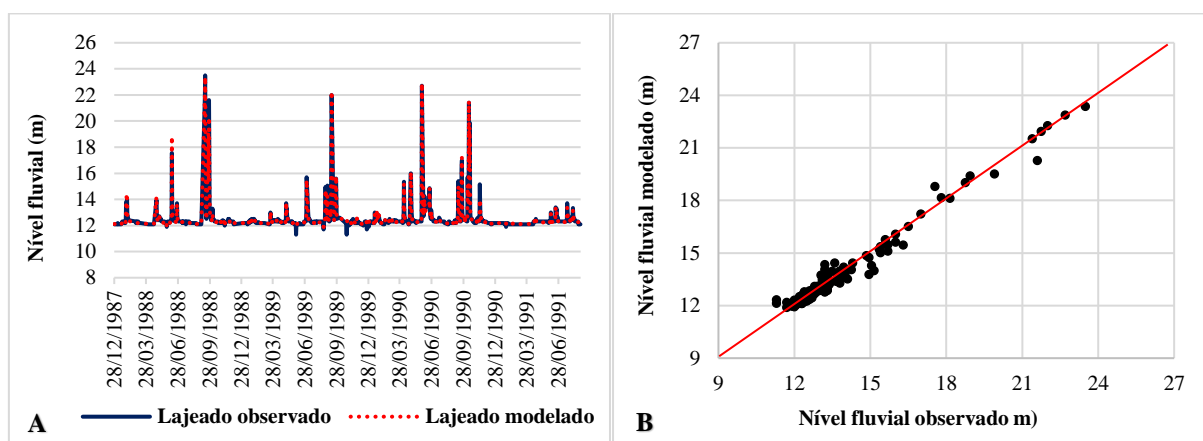
Em que: *EAM* = erro absoluto médio; *EPM* = erro proporcional médio; *RMSE* = raiz do erro quadrático médio; *EA95* = quantil 0,95 dos erros absolutos; *NS* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *NSA* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe Adaptado; *R²* = coeficiente de determinação.

Fonte: Da autora (2017).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 12, verifica-se que a modelagem dos níveis fluviais num horizonte de 6h à frente, a partir de RNAs, obteve um desempenho muito satisfatório, com R^2 de 0,980, indicando que as variáveis empregadas explicam 98% das cotas observadas em Lajeado. O bom ajuste do modelo está representado na Figura 26 (A). Os valores

de NS (0,980) e NSA (0,978) também apontam a alta eficiência de modelagem dos níveis, e, indicam, inclusive, que há pouca margem para melhoramentos posteriores do modelo, assim como observaram Pedrollo e Pedrollo (2013) em seu estudo. Além disso, ao observar a Figura 26 (B) fica evidente que o modelo calibrado por RNAs apresenta maior precisão para níveis de cheia e inundação do que o modelo calibrado por RM.

Figura 26 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RNAs



Fonte: Da autora (2017).

Os resíduos oriundos da modelagem dos níveis da amostra de validação foram insignificantes, com EAM de 0,07 m; EPM de 0,505 %; RMSE de 0,138 m, e EA95 de 0,266 m, salientando-se que os valores encontrados foram inferiores à modelagem a partir do MOD_RM. Mas, é importante frisar, que essa melhora de desempenho do modelo pode ser decorrente da quantidade de variáveis explicativas empregadas e não da técnica matemática utilizada na modelagem, uma vez que para o MOD_RM foram utilizadas 2 variáveis de cota, e, para o MOD_RNAs, 4 dados de entrada, incluindo informações de nível e precipitação.

Com o intuito de verificar o desempenho do MOD_RNAs considerando somente eventos de inundação, foram separadas as 9 datas constantes dentro do período de validação com cotas acima de 18,3 m. A fim de compatibilizar a análise com o modelo baseado em eventos discretos (MOD_1980), também foram consideradas as duas datas (20%) mais recentes com cotas entre 16 e 18,3 m. As medidas de qualidade do MOD_RNAs somente para esse conjunto de informações estão representadas na Tabela 13.

Constata-se que apesar da amostra de níveis de cheia e inundação ser significativamente menor do que o conjunto de dados em torno da cota média observada, as RNAs conseguiram calibrar um bom modelo para esses eventos também, mantendo o R^2 (0,951) e NS (0,950)

elevados. Observa-se, que esses coeficientes ficaram um pouco inferiores à validação do MOD_1980, mas, nada significativo. O bom ajuste e a eficiência do MOD_RNAs em prever eventos hidrológicos extremos no município de Lajeado, num horizonte de 6 h, pode ser acompanhado no Gráfico 5.

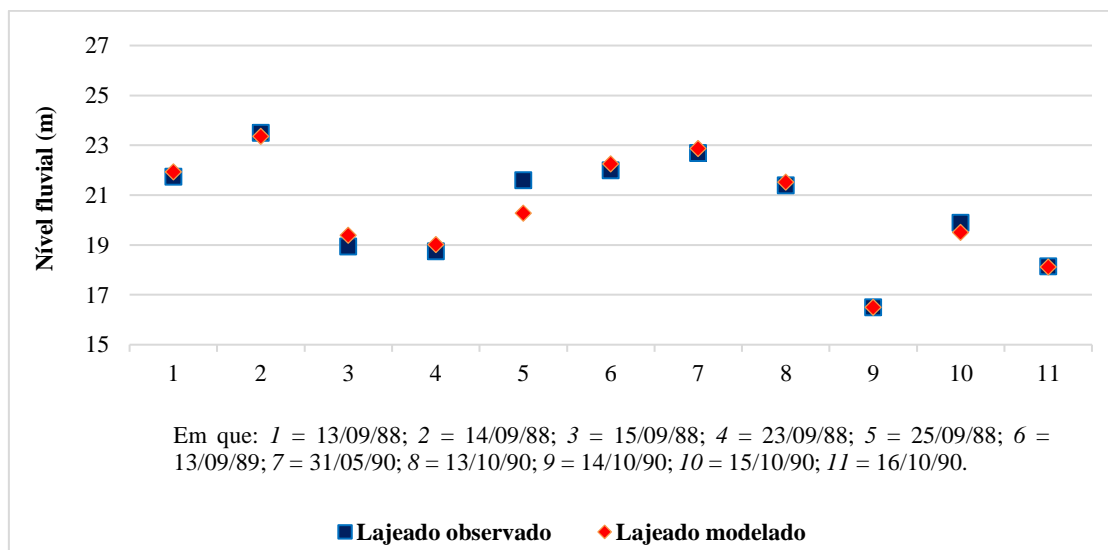
Tabela 13 – Medidas de desempenho do modelo baseado em séries horárias contínuas (MOD_RNAs) considerando somente eventos de cheia e inundação

Medidas de desempenho	Horizonte de previsão (t+6)
EAM (m)	0,304
EPM (%)	1,458
RMSE (m)	0,461
EA95 (m)	0,902
NS	0,950
R²	0,951

Em que: *EAM* = erro absoluto médio; *EPM* = erro proporcional médio; *RMSE* = raiz do erro quadrático médio; *EA95* = quantil 0,95 dos erros absolutos; *NS* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *R²* = coeficiente de determinação.

Fonte: Da autora (2017).

Gráfico 5 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado durante a validação do MOD_RNAs, considerando somente eventos de cheia e inundação



Fonte: Da autora (2017).

Os resíduos da modelagem também se mantêm relativamente baixos com EAM de 0,3 m; EPM de 1,46 %; RMSE de 0,46 m, e, EA95 de 0,9 m, destacando-se que são inferiores aos valores encontrados perante a validação do MOD_1980. Ao visualizar a Tabela 14, nota-se, que em apenas 1 das modelagens o erro foi um pouco superior a 1 m, sendo relativo à data de 25/09/1988, em que a cota foi subestimada em 1,32 m. Para as demais datas os erros foram iguais ou inferiores a 0,45 m.

Tabela 14 – Cotas observadas e modeladas em Lajeado, com seus respectivos resíduos durante a validação do MOD_RNAs, considerando somente eventos de cheia e inundação

Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)	Data	Cota Lajeado observada	Cota Lajeado modelada	Resíduo (m)
13/09/1988	21,75	21,94	0,19	31/05/1990	22,70	22,87	0,17
14/09/1988	23,50	23,37	-0,13	13/10/1990	21,40	21,52	0,12
15/09/1988	18,95	19,40	0,45	14/10/1990	16,50	16,51	0,01
23/09/1988	18,75	19,02	0,27	15/10/1990	19,90	19,51	-0,39
25/09/1988	21,60	20,28	-1,32	16/10/1990	18,15	18,13	-0,02
13/09/1989	22,00	22,26	0,26	-----			

Fonte: Da autora (2017).

A partir dos resultados e das observações realizadas é possível apontar que modelo matemático calibrado por RNAs para o horizonte (t+6) apresenta eficiência satisfatória, inclusive para eventos de cheia e inundação, permitindo que se tenha a antecipação de 6 h de um evento hidrológico extremo no município de Lajeado.

5.3 Análise de desempenho dos modelos matemáticos

5.3.1 Modelos baseados em eventos discretos - Abordagem 1

Considerando os resultados apresentados nos subcapítulos anteriores e sintetizados na Tabela 15, tem-se que os modelos matemáticos para previsão de níveis fluviais de inundação no município de Lajeado baseados em eventos discretos apresentaram desempenho satisfatório, com erros pouco expressivos e próximos de zero. O maior erro em ambas as séries é representado pelo EA (95), mas, ainda assim seus valores representam um bom desempenho dos modelos na previsão de cotas para Lajeado. Considerando os resultados da calibração e validação do MOD_1980, por exemplo, tem-se respectivamente, que em 95% dos eventos o resíduo não é superior a 0,786 m e 1,106 m. O NS e R² também apresentaram valores próximos de 1, reforçando a boa qualidade dos modelos em prever os níveis de cheia na cidade. Destaca-se novamente que o modelo MOD_1980 apresentou melhores resultados do que o MOD_1941, justamente por considerar informações de chuva e cota mais recentes, confiáveis e precisas. No entanto, é importante esclarecer que o MOD_1980 não é recomendado para previsão de inundações extremas em Lajeado, visto que durante o ajuste do modelo não foi considerado

nenhum evento de inundação com cota superior a 28 m no município, sendo que para estes casos, acredita-se que o MOD_1941 apresente melhor desempenho.

Tabela 15 – Síntese das medidas de desempenho das amostras de validação dos modelos matemáticos desenvolvidos no presente estudo

Medidas de desempenho	Eventos discretos		Séries contínuas		
	MOD_1941	MOD_1980	MOD_RM	MOD_RNAs	MOD_RNAs*
EAM (m)	0,739	0,484	0,087	0,066	0,304
EPM (%)	3,498	2,434	0,658	0,505	1,458
RMSE (m)	0,888	0,607	0,175	0,138	0,461
EA95 (m)	1,565	1,106	0,336	0,266	0,902
NS	0,899	0,951	0,967	0,980	0,950
NSA	-	-	0,965	0,978	-
R²	0,963	0,956	0,971	0,980	0,951

Em que: *EAM* = erro absoluto médio; *EPM* = erro proporcional médio; *RMSE* = raiz do erro quadrático médio; *EA95* = quantil 0,95 dos erros absolutos; *NS* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *NSA* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe Adaptado; *R²* = coeficiente de determinação. *Considerando somente eventos de cheia e inundação.

Fonte: Da autora (2017).

Considerando outros estudos, verificou-se que ambos os modelos baseados em eventos discretos desenvolvidos nessa pesquisa apresentaram maior precisão na previsão de níveis fluviais na cidade de Lajeado, o que demonstra que a precipitação com filtro de decaimento exponencial junto à bacia complementar tem influência sobre os eventos de cheia em Lajeado, uma vez que permite a modelagem de sua contribuição nas vazões observadas no Rio Taquari, entre Encantado e Lajeado. Mas, é preciso mencionar que os modelos desenvolvidos, se comparados aos propostos por Eckhardt (2008) e Kurek (2016), exigem um maior conjunto de informações e maior esforço para sua manipulação, uma vez que além de dados de cotas a montante, também é preciso realizar o levantamento de dados de precipitação na área de estudo; obter o seu valor médio, e; aplicar o filtro de decaimento exponencial, para na sequência empregar o modelo matemático de previsão de níveis.

Também é importante ressaltar que a precipitação com filtro de decaimento exponencial empregada nesse estudo foi calibrada considerando informações diárias de chuva, visto não haver um conjunto de dados horários representativo disponível atualmente. Desse modo, os modelos propostos foram ajustados para realizar a previsão de nível fluvial em Lajeado uma vez ao dia. Caso forem empregados em escala horária, deve-se manter a variável de precipitação diária filtrada fixa para todos os horários do dia, alterando-se somente os dados de cota observados em Encantado, como exemplificado a seguir para o evento de inundação de 20/10/2016.

Esse evento de cheia e inundação, ocorrido entre os dias 17 e 20/10/2016, fora causado por áreas de instabilidades associadas a um sistema de baixa pressão e uma frente fria, por vezes alimentadas por ar quente trazido por correntes de jato em baixos níveis da atmosfera, que provocaram chuvas volumosas na bacia durante o período, de modo que às 15 h do dia 20 o rio Taquari atingiu seu pico na cidade de Lajeado.

Para exemplificar a aplicação dos modelos baseados em eventos discretos em escala horária, foi realizado o levantamento das cotas horárias observadas em Encantado e Lajeado, e os dados de precipitação da área da bacia complementar, a fim de obter a chuva média filtrada. Como a defasagem temporal do pico de inundação entre os municípios de Encantado e Lajeado foi de 7 h, fixou-se essa defasagem para todo o período de análise para possibilitar um acompanhamento do desempenho dos modelos. Verifica-se na Tabela 16, que, de modo geral, o MOD_1980 apresenta erros menos expressivos que o MOD_1941, sendo o EAM do período, respectivamente, de 0,34 m e 0,81 m.

Tabela 16 – Aplicação dos modelos baseados em eventos discretos em escala horária para a inundação de outubro de 2016

Data	Hora	Nm	Pf	Nj	Njp (1941)	E	Nj	Njp (1980)	E
17/10/16	22:00	5,30	15,04	14,44			14,44		
	23:00	5,25	15,04	14,45			14,45		
	0:00	5,27	15,04	14,41			14,41		
18/10/16	1:00	5,69	28,64	14,37			14,37		
	2:00	6,71	28,64	14,37			14,37		
	3:00	7,91	28,64	14,37			14,37		
	4:00	8,90	28,64	14,51			14,51		
	5:00	9,66	28,64	14,96	14,81	-0,15	14,96	14,82	-0,14
	6:00	10,28	28,64	15,54	14,77	-0,77	15,54	14,78	-0,76
	7:00	10,77	28,64	16,27	14,79	-1,48	16,27	14,80	-1,47
	8:00	11,26	28,64	16,92	16,31	-0,61	16,92	16,46	-0,46
	9:00	11,67	28,64	17,47	17,11	-0,36	17,47	17,18	-0,29
	10:00	11,94	28,64	18,01	18,04	0,03	18,01	18,02	0,01
	11:00	12,15	28,64	18,47	18,81	0,34	18,47	18,71	0,24
	12:00	12,38	28,64	18,90	19,40	0,50	18,90	19,24	0,34
	13:00	12,44	28,64	19,22	19,88	0,66	19,22	19,67	0,45
	14:00	12,50	28,64	19,52	20,26	0,74	19,52	20,01	0,49
	15:00	12,53	28,64	19,79	20,64	0,85	19,79	20,36	0,57
	16:00	12,52	28,64	19,97	20,96	0,99	19,97	20,64	0,67
	17:00	12,52	28,64	20,15	21,17	1,02	20,15	20,83	0,68
	18:00	12,41	28,64	20,29	21,33	1,04	20,29	20,98	0,69
	19:00	12,34	28,64	20,42	21,51	1,09	20,42	21,14	0,72

Data	Hora	Nm	Pf	Nj	Njp (1941)	E	Nj	Njp (1980)	E
	20:00	12,28	28,64	20,55	21,56	1,01	20,55	21,18	0,63
	21:00	12,20	28,64	20,59	21,60	1,01	20,59	21,22	0,63
	22:00	12,14	28,64	20,67	21,63	0,96	20,67	21,24	0,57
	23:00	12,06	28,64	20,71	21,62	0,91	20,71	21,24	0,53
	0:00	12,02	28,64	20,75	21,62	0,87	20,75	21,24	0,49
19/10/16	1:00	11,96	33,69	20,81	21,53	0,72	20,81	21,16	0,35
	2:00	11,90	33,69	20,84	21,48	0,64	20,84	21,11	0,27
	3:00	11,84	33,69	20,86	21,43	0,57	20,86	21,07	0,21
	4:00	11,80	33,69	20,85	21,37	0,52	20,85	21,01	0,16
	5:00	11,73	33,69	20,86	21,32	0,46	20,86	20,97	0,11
	6:00	11,68	33,69	20,85	21,26	0,41	20,85	20,92	0,07
	7:00	11,61	33,69	20,85	21,23	0,38	20,85	20,89	0,04
	8:00	11,58	33,69	20,80	22,06	1,26	20,80	21,36	0,56
	9:00	11,49	33,69	20,79	22,02	1,23	20,79	21,31	0,52
	10:00	11,42	33,69	20,76	21,97	1,21	20,76	21,27	0,51
	11:00	11,30	33,69	20,69	21,94	1,25	20,69	21,24	0,55
	12:00	11,30	33,69	20,65	21,89	1,24	20,65	21,19	0,54
	13:00	11,29	33,69	20,64	21,85	1,21	20,64	21,16	0,52
	14:00	11,30	33,69	20,64	21,79	1,15	20,64	21,11	0,47
	15:00	11,44	33,69	20,65	21,77	1,12	20,65	21,09	0,44
	16:00	11,64	33,69	20,70	21,70	1,00	20,70	21,03	0,33
	17:00	11,97	33,69	20,74	21,65	0,91	20,74	20,98	0,24
	18:00	12,37	33,69	20,81	21,55	0,74	20,81	20,89	0,08
	19:00	12,79	33,69	20,96	21,55	0,59	20,96	20,89	-0,07
	20:00	13,26	33,69	21,05	21,54	0,49	21,05	20,89	-0,16
	21:00	13,80	33,69	21,22	21,55	0,33	21,22	20,89	-0,33
	22:00	14,30	33,69	21,41	21,66	0,25	21,41	20,99	-0,42
	23:00	14,84	33,69	21,64	21,82	0,18	21,64	21,13	-0,51
	0:00	15,38	33,69	21,84	22,07	0,23	21,84	21,36	-0,48
20/10/16	1:00	15,88	31,47	22,12	22,38	0,26	22,12	21,64	-0,48
	2:00	16,29	31,47	22,37	22,71	0,34	22,37	21,94	-0,43
	3:00	16,65	31,47	22,61	23,07	0,46	22,61	22,26	-0,35
	4:00	16,93	31,47	22,89	23,49	0,60	22,89	22,64	-0,25
	5:00	17,08	31,47	23,16	23,88	0,72	23,16	22,99	-0,17
	6:00	17,23	31,47	23,36	24,30	0,94	23,36	23,37	0,01
	7:00	17,34	31,47	23,57	24,72	1,15	23,57	23,75	0,18
	8:00	17,37	31,47	23,79	24,69	0,90	23,79	23,87	0,08
	9:00	17,35	31,47	23,91	25,01	1,10	23,91	24,16	0,25
	10:00	17,29	31,47	24,15	25,29	1,14	24,15	24,41	0,26
	11:00	17,17	31,47	24,24	25,50	1,26	24,24	24,60	0,36
	12:00	17,03	31,47	24,35	25,62	1,27	24,35	24,71	0,36
	13:00	16,84	31,47	24,44	25,74	1,30	24,44	24,81	0,37
	14:00	16,61	31,47	24,50	25,82	1,32	24,50	24,89	0,39
	15:00	16,40	31,47	24,56	25,85	1,29	24,56	24,91	0,35

Data	Hora	Nm	Pf	Nj	Njp (1941)	E	Nj	Njp (1980)	E
	16:00	16,09	31,47	24,54	25,83	1,29	24,54	24,90	0,36
	17:00	15,74	31,47	24,54	25,78	1,24	24,54	24,86	0,32
	18:00			24,54	25,69	1,15	24,54	24,77	0,23
	19:00			24,46	25,58	1,12	24,46	24,67	0,21
	20:00			24,40	25,43	1,03	24,40	24,54	0,14
	21:00			24,26	25,26	1,00	24,26	24,38	0,12
	22:00			24,20	25,09	0,89	24,20	24,23	0,03
	23:00			24,01	24,85	0,84	24,01	24,02	0,01
	0:00			23,81	24,58	0,77	23,81	23,77	-0,04

Em que: *Nm* e *Nj* = nível fluvial observado em Encantado e Lajeado, respectivamente; *Pf* = precipitação com filtro de decaimento exponencial; *Njp (1941)* e *Njp (1980)* = nível previsto para Lajeado pelo MOD_1941 e MOD_1980, respectivamente, considerando uma defasagem temporal de 7 h; *E* = resíduo da modelagem.

Fonte: Da autora (2017).

5.3.2 Modelos baseados em séries horárias contínuas - Abordagem 2

A partir das medidas de desempenho sintetizadas na Tabela 15 e das análises realizadas acerca dos modelos de previsão baseados em séries horárias contínuas, verificou-se que a modelagem para o horizonte (t+6) apresentou resultados satisfatórios com R^2 , NS e NSA elevados e próximos de 1, e erros pouco expressivos, inclusive para eventos de cheia e inundação se considerado, principalmente, o MOD_RNAs, segundo o qual, em 95% das modelagens o erro não é superior a 0,9 m. Como o conjunto de variáveis independentes foi diferente para as duas técnicas matemáticas (RM e RNAs), pode-se suspeitar que o melhor desempenho do modelo calibrado por RNAs seja decorrente do maior número de variáveis de entrada, incluindo dados fluviométricos e pluviométricos, de modo que os dados de chuva permitiram representar a contribuição de água da bacia complementar.

Ao comparar o modelo calibrado por RNAs (MOD_RNAs) ao MOD_1980, elaborado na AB1, não é possível apontar qual dos dois tipos de modelagem apresentou maior precisão para eventos hidrológicos extremos, visto que as análises realizadas apontaram R^2 e NS similares. Já os resíduos foram menores para o MOD_RNAs, mas, somente com esses parâmetros não é possível apontar se o mesmo é mais eficiente ou não. O que é possível destacar é que, em virtude dos bons resultados alcançados, essa pode ser uma nova técnica de previsão para eventos de cheia e inundação no município de Lajeado, tendo-se como vantagem um horizonte de previsão de 6 h definido. Isso, permite que se tenha uma antecipação de um cenário de cheia dentro desse intervalo e que as ações da Defesa Civil possam ser implementadas para

prevenir e/ou reduzir, principalmente, os danos sociais e econômicos. Lembrando-se, que a AB1 (MOD_1941 e MOD_1980) fornece a previsão de nível sem um horizonte fixo, visto que o tempo de deslocamento de pico de um evento hidrológico extremo, entre Encantado e Lajeado, é variável de uma situação para outra.

Também é importante reforçar que os modelos calibrados com séries horárias contínuas podem ser empregados diariamente e permitem modelar níveis mínimos, médios e máximos, dentro da faixa de 10 a 24,5 m, que foram os extremos empregados na calibração. No entanto, para a sua aplicação, se considerado o modelo calibrado por RNAs, é necessário um conjunto de informações ainda maior do que na AB1, e, é fundamental que se tenha um conhecimento com relação ao funcionamento das RNAs. Além disso, destaca-se que, assim como na AB1, o MOD_RNAs foi calibrado considerando dados diários de chuva filtrada e acumulada, de modo que a previsão fosse realizada às 6 h para o horizonte do meio-dia. Mas, ressalta-se que ele também pode ser empregado em escala horária, sendo que para isso, deve ser considerada a defasagem temporal de 6 horas entre as cotas registradas e previstas, e mantidos fixos os dados de chuva para todos os horários do dia, assim como exemplificado na AB1.

Por fim, independentemente de qual dos modelos seja aplicado, respeitando-se os limites de cotas para quais foram calibrados, é possível apontar que, tem-se disponível novas ferramentas para a previsão de níveis fluviais no município de Lajeado, que é em média atingido por um evento de inundação a cada ano, permitindo que sejam atenuados os impactos associados a esses eventos hidrológicos extremos.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e nas análises realizadas, verificou-se que os objetivos do presente estudo foram alcançados a partir da metodologia proposta, sendo que apesar da consistência dos dados pluviométricos e fluviométricos ter sido realizada de forma simplificada, apenas com a exclusão dos dados duvidosos, foi possível elaborar um conjunto de informações hidrometeorológicas confiável, que permitiu a elaboração e o bom desempenho dos modelos matemáticos.

Ambas as configurações de calibração dos modelos matemáticos apresentaram resultados satisfatórios, ressaltando-se que o modelo ajustado a partir das cotas máximas observadas em Encantado e da chuva filtrada na bacia complementar, com dados a partir de 1980 (MOD_1980), mostrou-se mais preciso na previsão de níveis de inundação para Lajeado do que o modelo que considerou eventos discretos desde 1941 (MOD_1941). No entanto, o primeiro modelo não é indicado para a previsão de níveis acima de 28 m, por não ter considerado nenhum evento dessa magnitude, sendo que para esses casos, é esperado que o modelo calibrado com dados a partir de 1941 apresente melhor desempenho.

Os modelos baseados em dados contínuos também se mostraram promissores para a previsão de níveis fluviais, principalmente, o calibrado por RNAs (MOD_RNAs), que a partir das cotas observadas em Lajeado e Encantado, e, dos dados de precipitação filtrada, e acumulada em 3 dias anteriores na bacia complementar forneceu resultados fidedignos, inclusive para eventos de cheia e inundação, tendo-se como grande vantagem o horizonte de previsão definido de 6 h. Destaca-se que em comparação ao modelo baseado em eventos discretos (MOD_1980), as análises realizadas não permitiram apontar qual é mais preciso na previsão de níveis de inundação na cidade de Lajeado, sendo, portanto, ambas as configurações

indicadas para futuras previsões, que podem e devem ser constantemente atualizadas para a modelagem do alcance de uma inundação na cidade de Lajeado.

É importante ressaltar também que, como esperado, o emprego de níveis de montante e jusante em conjunto com informações de precipitação da bacia complementar, resultou na melhora da qualidade de previsão dos níveis fluviais de inundação na cidade de Lajeado, em comparação a estudos anteriores, visto que a chuva da bacia complementar permite modelar a contribuição de água da área não monitorada por estações linimétricas no nível observado em Lajeado.

Com base nisso, nota-se a importância de realizar constantes atualizações nos modelos de previsão, uma vez que a série de dados confiáveis na bacia é pequena e que a cada ano tem-se novas informações para ajustar o modelo. Da mesma forma, que se faz importante a tentativa de emprego de novas variáveis explicativas e diferentes técnicas de modelagem, a fim de prever os níveis de forma mais fidedigna, melhorando a gestão desses eventos hidrológicos extremos por parte da Defesa Civil, e, diminuindo, conseqüentemente, os danos sociais, econômicos e ambientais associados à ocorrência de inundações.

Tendo em vista os resultados satisfatórios obtidos, tem-se como recomendações para futuros estudos:

- a recalibração dos modelos propostos nas duas abordagens desse estudo com dados horários de nível e de precipitação, quando o conjunto de informações for maior;
- a elaboração de modelos matemáticos que também considerem como variável de entrada a previsão de precipitação para diferentes horizontes de dias à frente, ou até mesmo, a previsão meteorológica por conjunto (*ensemble*);
- a elaboração de diferentes modelos matemáticos para previsão de níveis fluviais e a sua aplicação em conjunto;
- e, a realização da previsão de níveis fluviais dentro de um intervalo de confiança e não para um valor fixo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistemas de Informações Hidrológicas.**

2017. Disponível em: <

<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoeshidrologicas/redehidro.aspx>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

AKAMINE, C. T.; YAMAMOTO, R. K. **Estudo Dirigido de Estatística Descritiva.** 3. ed.

São Paulo: Érica, 2013. E-book. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br>>

Acesso em: 18 abr. 2017

ALVES, A.; BIANCHINI, C. D.; MALHEIROS, M.; QUARTIERI, M. T.; SALVADOR, P.

F.; ECKHARDT, R. R. Correlação entre o nível atingido e os prejuízos causados pelas inundações do Rio Taquari no Município de Cruzeiro do Sul-RS. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 5, n. 4, 2013.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística:** para cursos de engenharia e informática. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BERNARD, J. M.; TUTTLE, R. W. **Stream Corridor Restoration – principles, processes and practices.** Wetlands Engineering and River Restoration Conference. EUA, 1998.

Disponível em:

<https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044574.pdf> Acesso em: 19 fev. 2017

BOMBASSARO M.; ROBAINA L. E. S. Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Geografias**, v. 6, n. 2, p. 69-86, 2010.

BOTH, G. C.; FERREIRA, E. R. Estudo das enchentes no Vale do Taquari: causas e propostas de controle. In: MOSTRA DE ENSINO, EXTENSÃO E PESQUISA DA UNIVATES, 4., 2001, Lajeado. **Anais...** Lajeado: Univates, 2001. p. 155.

BRASIL. Ministério das Cidades/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

_____. Ministério da Integração Nacional. **Instrução normativa n. 01**, de 24 de agosto de 2012. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=822a4d42-970b-4e80-93f8-dae395a52d1&groupId=301094>. Acesso em: 18 mar. 2017.

BRAVO, J. M.; PEDROLLO, O. C.; COLLISCHONN, W; PAZ, A. R. Previsões de Curto Prazo de Vazão Afluente ao Reservatório de Furnas Utilizando Redes Neurais Artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 13, n. 2, p. 77-88, 2008.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

BRITTO, F. P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Regionalização sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 2, p. 35-51, 2006.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres**. 2. ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998. 173 p.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Orgs.) **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CENTRO DE INFORMAÇÕES HIDROMETEOROLÓGICAS - CIH. **Atualização do modelo de previsão de enchente** (informações não publicadas). Lajeado: Univates, 2013.

CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES – CENAD. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais: 2013**. Brasília: CENAD, 2014. 106 p.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN. **Notícias**. 2017. Disponível em: < <http://www.cemaden.gov.br/>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES / UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. Volume Brasil. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p.

_____. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. Volume Rio Grande do Sul. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 184 p.

CHOW, V. T. **Open-channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 728 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1. ed. 2ª reimp. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

COELHO-BARROS, E. A.; SIMÕES, P. A.; ACHCAR, J. A.; MARTINEZ, E. Z.; SHIMANO, A. C. Métodos de estimação em regressão linear múltipla: aplicação a dados clínicos. **Revista Colombiana de Estadística**, v. 31, n. 1, p. 111-129, 2008.

COLLISCHONN, E. **Inundações em Venâncio Aires/RS: Interações entre as Dinâmicas Natural e Social na Formação de Riscos Socioambientais Urbanos**. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do Satélite TRMM na Estimativa de Precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/01, p. 93-99, 2007.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Sistema de Alerta de Eventos Críticos – SACE**. 2017. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

CONTI, G. N. **Estimativa da Precipitação através de Técnicas de Sensoriamento Remoto: Estudo de Caso para o Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2002.

DIEDRICH, V. L.; ECKHARDT, R. R.; FERREIRA, E. R.; HAETINGER, C. **Mapeamento e Previsão das Áreas Urbanas Inundáveis na Cidade de Lajeado – RS – Brasil**. In: XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia, 2010, Aracaju/SE. Anais XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia, 2010.

DOOGE, J. C. I. **Linear Theory of Hydrologic Systems**. Technical Bulletin n. 1468. United States Department of Agriculture, 1973. 339 p.

DORNELLES, F. **Previsão Contínua de Níveis Fluviais com Redes Neurais utilizando Previsão de Precipitação: Investigação Metodológica da Técnica**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J. A.; PEDROLLO, O. C. Artificial Neural Network Methods Applied to Forecasting River Levels. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 18, n. 4, p. 45-54, 2013.

ECKHARDT, R. R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado / RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

ECKHARDT, R. R.; QUARTIERI, M. T.; ALVES, A.; SALVADOR, P. F.; MALHEIROS, M. G.; BIANCHINI C. D. **Impactos Econômicos das Inundações no Vale do Taquari**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves/RS. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/fc1fd7ecf4ba09f8e9b7c49997c609db_cb2bb4588ebc51708b404bb1c7666033.pdf> Acesso em: 04 mar. 2017.

EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT) - THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE. **Home e Database**. 2017. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 17 mar. 2017.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CARVALHO, M. H. Eventos de Precipitação na Cidade de Pelotas-RS associados a Processos e Sistemas Sinóticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 134-159, 2007.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

FERRI, G. **História do Rio Taquari-Antas**. Encantado: Grafen, 1991.

FERRI, G.; TOGNI, A. C. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Lajeado: Ed. da Univates, 2012.

FILHO, G. M. M.; ANDRADE, R. S.; JUNIOR, J. C. Z.; FILHO, L. N. L. M. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER – FEPAM - RS. **Diagnóstico Ambiental da Bacia do Taquari-Antas/RS**. 2001. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/biblioteca.asp>> Acesso em: 08 abr. 2017.

_____. **Qualidade Ambiental: Região Hidrográfica do Guaíba**. 2017. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp>> Acesso em: 08 abr. 2017.

_____. **Qualidade Ambiental: Região Hidrográfica do Guaíba - Rio Taquari e Rio das Antas**. 2017. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/taquariantas.asp>> Acesso em: 04 mar. 2017.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Edgard Blüger, 2006.

GERHARD, F.; BORN, B.; OLIVEIRA, G. G.; MORAES, S. R.; ECKHARDT, R. R. **Aprimoramento do Modelo de Previsão de Níveis de Inundação para o Município de Lajeado, RS.** In: I Congresso Brasileiro de Redução de Riscos e Desastres, 2016, Curitiba/PR. Anais I Congresso Brasileiro de Redução de Riscos e Desastres, 2016.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. **Considerações sobre as inundações no Brasil.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa/PB. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

GOMES, L. F. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VALENÇA, M. J. S. Modelo Baseado na Técnica de Redes Neurais para Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 15, n. 1, p. 5-15, 2010.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2007.

GREINER, C. **Avaliação do Referencial de Nível das Inundações da Cidade de Lajeado/RS com relação à Régua Linimétrica do Porto de Estrela/RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental Bacharelado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

GRIBBIN, J. E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais.** São Paulo: Cengage Learning, 2013.

GUARNIERI, R. A. **Emprego de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo ETA.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation.** New York: Macmillan College Publishing Company, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010.** 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>> Acesso em: 17 fev. 2017.

_____. **Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul.** 2002. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>> Acesso em: 25 abr. 2017.

INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO (ICMC) – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Redes Neurais Artificiais.** 2017. Disponível em: <<http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/neural/>> Acesso em: 17 abr. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Sobre o INMET**. 2017. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/> > Acesso em: 08 mar. 2017.

JIMENÉS, K. Q. **Modelagem Hidrológica com Uso da Estimativa da Chuva por Sensoriamento Remoto**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

KARMANN, I. Água: ciclo e ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. (Orgs.) **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 186-209.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos** – Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006. 124 p.

KUREK, R. K. M. **Análise das Inundações no Vale do Taquari/RS como Subsídio à Elaboração de um Modelo de Previsão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

LAJEADO (Município). Prefeitura Municipal. **Físico-Geográfico**. 2017. Disponível em: <http://www.lajeado.rs.gov.br/?titulo=Lajeado&template=conteudo&categoria=931&codigoCategoria=931&idConteudo=2951&tipoConteudo=INCLUDE_MOSTRA_CONTEUDO> Acesso em: 08 abr. 2017.

LIEW, M. W V.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais**. Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2008.

MATOS, A. B. **Efeito do controle de montante na previsão hidrológica de curto prazo com redes neurais: aplicação à bacia do rio Ijuí**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2012.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, v.5, p.115-133, 1943.

MELLER, A. **Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2012.

MELO, H. A. **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2010.

MENDONÇA, F.; DANI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana**: do projeto tradicional à sustentabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Ciclo hidrológico**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

MORAES, S. R. **Imagens da inundação de outubro de 2016 no município de Lajeado** (imagens não publicadas). Lajeado, 2016.

_____. **Mapeamento das Áreas e Edificações Atingidas pelas Inundações do Rio Taquari na Área Urbana do Município de Lajeado/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental Bacharelado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.

MORAES, S. R.; BOTH, G. C.; KUREK, R. K. M.; ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C. **Relação do Fenômeno ENOS com a Ocorrência de Inundações no Município de Lajeado/RS**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves/RS. Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. rev. e atual. Viçosa: UFV, 2007.

MOREIRA, G. C. **Previsão de Níveis Fluviais em Tempo Atual com Modelo de Regressão Adaptativo: Aplicação na Bacia do Rio Uruguai**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98, p. 257–277, 1999.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. E-book. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Livro-%22Hidrologia-Estatistica%22-981.html>> Acesso em: 18 abr. 2017

NASCIMENTO, D. T. F. **Chuvas no Estado de Goiás e no Distrito Federal a partir de Estimativas por Satélite e Circulação Atmosférica**. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NÚCLEO DE INFORMAÇÕES HIDROMETEOROLÓGICAS - NIH. **Dados sobre Enchentes no Vale do Taquari** (informações não publicadas). Lajeado: Univates, 2017.

OLIVEIRA, G. G. **Modelos para Previsão, Espacialização e Análise das áreas Inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Relação entre a Suscetibilidade a Inundações e a Falta de Capacidade nos Condutos da Sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 16, n. 1, p. 5-15, 2011.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; BRUBACHER, J. P.; SIRANGELO, F. R. **Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa/PB. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; SALDANHA, D. L. Modelos de Previsão e Espacialização das Áreas Inundáveis em Montenegro, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 4, p. 355-378, 2012.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. Simplifying artificial neural network models of river basin behaviour by an automated procedure for input variable selection. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 40, p. 47-61, 2015.

_____. Stochastic approach to analyzing the uncertainties and possible changes in the availability of water in the future based on scenarios of climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 3585-3604, 2015.

OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D. L.; GUASSELLI, L. A. Modelos para a Espacialização e Previsão de Áreas Inundáveis na Zona Urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 38, n. 2, p. 132-146, 2011.

PBTA. Plano de Bacia Taquari-Antas. **Relatório técnico 01**. Fase AP –Atividade Preliminar. Atividade AP.2 a AP.5. Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul, Serviços Técnicos de Engenharia S/A, mai. 2011. Disponível em: <<https://taquariantas.wixsite.com/comite/documentos>>. Acesso em: 08 abr. 2017.

PEDROLLO, O.; PEDROLLO, M. Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais. In: GUASSELLI, L.; OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. C. M (Orgs.). **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. Porto Alegre: Evangraf, 2013. p. 101-120.

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

REBOITA, M. S. **Elementos da Variabilidade Climática no Extremo Sul do Brasil, no período de 1990 a 2001**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2004.

RECKZIEGEL, B. W. **Levantamento dos Desastres Desencadeados por Eventos Naturais Adversos no estado do Rio Grande do Sul no Período de 1980 a 2005**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2007.

REIS, J. B. C. **Monitoramento e Alerta de Inundação no Município de Itajubá (MG) através de Modelos Matemáticos**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2014.

REIS, J. B. C.; PONS, N. A. D.; LOPES, E. S. S. Monitoramento e Alerta de Inundação no Município de Itajubá (MG) por Regressão Polinomial. **Revista Geociências**, v. 35, n. 1, p. 134-148, 2016.

RODRIGUES, D. B. B.; MENDIONDO, E. M. Bacias Hidrográficas: Caracterização e Manejo Sustentável. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (Coords.). **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 47-74.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para o planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning Internal Representations by Error Propagation. In: RUMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L. (Orgs.). **Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition**. v. 1. Cambridge: MIT press, 1986. p. 318-362

SALAS, J. D. Hidrologia de Zonas Áridas Y Semiáridas. **Ingenieria Del Agua**, v. 7, n. 4, p. 409-429, 2000.

SANTANA, S. A. **Modelagem de comunicação em WebGIS para difusão de dados geográficos e promoção de análise espacial**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2009.

SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental** – Brasília: MMA, 2007. 196 p.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMA - RS. **Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. 2017. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/bacia-hidrografica-taquari-antas>> Acesso em: 08 abr. 2017.

SENE, K. **Flood Warning, Forecasting and Emergency Response**. United Kingdom: Springer Science, 2008. 303 p.

_____. **Hidrometeorology: Forecasting and Applications**. United Kingdom: Springer Science, 2010. 356 p.

SERVIÇO DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES – SMAD. **Sobre o SMAD e sala de situação.** 2017. Disponível em: < <http://www.smad.rs.gov.br/> > Acesso em: 12 mar. 2017.

SILVA, A. P. M. **Elaboração de Manchas de Inundação para o Município de Itajubá, utilizando SIG.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2006.

SILVA, V. S. V. **Estimativa de Precipitação Pontual em Diferentes Escalas para Uso em Modelo Concentrado Chuva-Vazão.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

SILVA, L. P. **Hidrologia:** engenharia e meio ambiente. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, J. B. L. **Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era – MG.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

SILVA, B. C.; CALHEIROS, H. C. Águas Superficiais. In: NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. (Orgs.). **Ciências ambientais para engenharia.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 85-122.

SIQUEIRA, V. A. **Previsão de Cheias por Conjunto em Curto a Médio Prazo: Bacia do Taquari-Antas/RS.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

SOBRINHO, J. A. F.; SILVA, C. A. **Uso de WebGIS para Exibição e Consulta de Informações Agropecuárias do Pantanal Matogrossense.** In: IV Congresso Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012, Recife/PE. Anais IV Congresso Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem Ordinária e Inverso do Quadrado da Distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. *Scientia Agraria*, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, A. **Probabilidade e estatística.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

STEINKE, E. T. **Climatologia fácil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 197 p.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação.** 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 399-432.

_____. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina – REGA**. v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004.

_____. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. 5ª reimp. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2013.

_____. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.) **Inundações Urbanas da América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B (Orgs.). **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

VIDAL, D. H. F. **Modelagem hidrodinâmica como suporte a avaliação e proposição de alternativas compensatórias para mitigação dos problemas de cheias urbanas na bacia do riacho Reginaldo em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2012.

WIDROW, B.; HOFF, M. E. Adaptive Switching Circuits. In: **1960 IRE WESCON Convention Record**, New York: IRE, 1960. p. 96-104.

WOLLMANN, C. A. Enchentes do Rio Grande do Sul do Século XXI. **Revista Mercator**, v. 13, n. 1, p. 79-91, 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Floods in the WHO European Region: health effects and their prevention**. Dinamarca, 2013. 146 p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Manual on Flood Forecasting and Warning**. Geneva, n. 1072, 2011. 142 p.

WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research. **Forecast verification - issues, methods and FAQ**. 2017. Disponível em: <<http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

YONEDA, S. L. **Análise Hidrológica utilizando Redes Neurais para previsão de séries de vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Relação de estações pluviométricas utilizadas no presente estudo

(Continua)

Código	Cidade	Coordenadas		Responsável	Operador	Disponibilidade de dados/período
		Longitude	Latitude			
3	Anta Gorda	-52,000360	-28,983210	Netsenses	Netsenses	18/02/2014 - 04/08/2015
2952006	Arroio do Meio	-52,083333	-29,316667	DEPRC	DEPRC	01/01/1949 - 31/12/1978
2953007	Arroio do Tigre	-52,952222	-29,194167	CEEE	CEEE	03/05/1969 - 31/12/2012
2852003	Arvorezinha	-52,183333	-28,866667	DEPRC	DEPRC	01/07/1948 - 31/12/1978
2852017	Arvorezinha	-52,166667	-28,783333	DEPRC	DEPRC	22/03/1952 - 31/12/1978
2952001	Barros Cassal	-52,584444	-29,085000	ANA	CPRM	01/04/1986 - 31/12/2016
2952002	Barros Cassal	-52,583333	-29,083333	DEPRC	DEPRC	01/07/1948 - 31/12/1978
86979	Bento Gonçalves	-51,534202	-29,164581	INMET	INMET	01/12/2006 - 31/12/2016
2951003	Bento Gonçalves	-51,516667	-29,150000	INMET	INMET	01/09/1935 - 31/12/2013
2951019	Bento Gonçalves	-51,633333	-29,166667	CEEE	CEEE	01/01/1996 - 31/12/2001
2951082	Bento Gonçalves	-51,523889	-29,075000	CERAN	CERAN	01/04/2009 - 31/12/2012
1	Bom Retiro do Sul	-51,950390	-29,608330	Netsenses	Netsenses	17/03/2013 - 31/12/2016
2952036	Boqueirão do Leão	-52,422500	-29,312500	ANA	CPRM	13/08/2004 - 31/12/2016
2951007	Carlos Barbosa	-51,483333	-29,283333	DEPRC	DEPRC	01/04/1952 - 31/12/1966
2851005	Casca	-51,973056	-28,571944	CEEE	CEEE	26/08/1944 - 31/12/2012
2851022	Casca	-51,866667	-28,619444	ANA	CPRM	09/10/1957 - 31/12/2016
2951022	Caxias do Sul	-51,190278	-29,335000	ANA	CPRM	28/04/1943 - 31/12/2016
2851037	Cotiporã	-51,700000	-28,999722	DEPRC	DEPRC	01/03/1951 - 31/12/1978
2951085	Cotiporã	-51,634167	-29,070000	CERAN	CERAN	30/03/2009 - 31/12/2012
2951089	Cotiporã	-51,674444	-29,065833	CERAN	CERAN	28/03/2009 - 31/12/2012
2951083	Cristal	-51,681389	-29,079722	CERAN	CERAN	31/03/2009 - 31/12/2012
2851006	Dois Lajeados	-51,833333	-28,983333	DEPRC	DEPRC	01/03/1951 - 31/12/1978

APÊNDICE A – Relação de estações pluviométricas utilizadas no presente estudo

(Continuação)

Código	Cidade	Coordenadas		Responsável	Operador	Disponibilidade de dados/período
		Longitude	Latitude			
2951010	Encantado	-51,859444	-29,237778	ANA	CPRM	19/04/1943 - 31/12/2016
2951011	Encantado	-51,866667	-29,233333	DEPRC	DEPRC	01/05/1943 - 31/12/1951
2951039	Encantado	-51,933333	-29,100000	DEPRC	DEPRC	01/01/1996 - 31/12/1997
ENC - P	Encantado	-51,85507	-29,23519	CPRM	CPRM	17/07/2015 - 31/12/2016
2852011	Ernestina	-52,566667	-28,500000	DEPRC	DEPRC	01/12/1948 - 31/12/1985
2852012	Espumoso	-52,850000	-28,733333	DEPRC	DEPRC	13/10/1950 - 29/02/1968
4	Estrela	-51,971750	-29,477340	Netsenses	Netsenses	07/08/2013 - 31/12/2016
2951012	Estrela	-51,983333	-29,516667	SOPRS	SOPRS	27/06/1950 - 31/03/1952
EST - P	Estrela	-51,96281	-29,47349	CPRM	CPRM	30/07/2015 - 31/12/2016
2951017	Farroupilha	-51,848889	-29,391111	CEEE	CEEE	01/11/1962 - 31/12/2016
2951014	Feliz	-51,300000	-29,450000	DEPRC	DEPRC	25/06/1950 - 31/12/1978
5	Fontoura Xavier	-52,346540	-28,981380	Netsenses	Netsenses	10/01/2014 - 08/05/2016
2851011	Guaporé	-51,900000	-28,916667	INMET	INMET	01/01/1912 - 26/11/1980
2851031	Guaporé	-51,950000	-28,900000	HIDROTÉRMICA	HIDROTÉRMICA	01/10/1970 - 31/12/1982
2851044	Guaporé	-51,879167	-28,844444	ANA	CPRM	01/05/1985 - 31/12/2016
2952035	Herveiras	-52,632500	-29,453889	ANA	CPRM	06/07/2004 - 31/12/2016
2852014	Ilópolis	-52,127500	-28,928611	CEEE	CEEE	16/08/1944 - 31/12/2016
11	Lajeado	-51,957642	-29,444556	NIH Univates	NIH Univates	13/01/2003 - 31/12/2016
2951018	Lajeado	-51,966667	-29,466667	ANA	ANA	20/10/1939 - 12/07/1980
2951063	Lajeado	-51,950000	-29,433333	INMET	INMET	02/10/1978 - 29/06/1988
6	Marau	-52,199140	-28,450250	Netsenses	Netsenses	10/01/2014 - 07/08/2015
2852016	Marau	-52,197500	-28,453056	CEEE	CEEE	27/08/1944 - 31/12/2012
2852028	Marau	-52,258333	-28,382500	CEEE	CEEE	01/06/1942 - 31/12/1982

APÊNDICE A – Relação de estações pluviométricas utilizadas no presente estudo

(Continuação)

Código	Cidade	Coordenadas		Responsável	Operador	Disponibilidade de dados/período
		Longitude	Latitude			
2852031	Marau	-52,366667	-28,466667	CEEE	CEEE	03/05/1959 - 31/12/2016
7	Marques de Souza	-52,095420	-29,325550	Netsenses	Netsenses	07/11/2013 - 31/12/2016
2951021	Montenegro	-51,428056	-29,668611	ANA	ANA	12/04/1943 - 31/10/1989
2951070	Muçum	-51,868056	-29,166389	ANA	CPRM	26/02/1987 - 31/12/2016
MUC - P	Muçum	-51,86722	-29,16694	CPRM	CPRM	06/04/2015 - 31/12/2016
2952007	Nova Bréscia	-52,016667	-29,216667	DEPRC	DEPRC	01/01/1949 - 31/12/1978
2951088	Nova Pádua	-51,323611	-29,063333	CERAN	CERAN	01/04/2009 - 31/12/2012
2951023	Nova Petrópolis	-51,100000	-29,366667	CEEE	CEEE	01/01/1999 - 31/12/2000
2851018	Nova Roma do Sul	-51,400000	-28,983333	DEPRC	DEPRC	11/04/1952 - 31/12/1978
2851059	Nova Roma do Sul	-51,461111	-28,971389	CERAN	CERAN	19/03/2009 - 31/12/2012
2951086	Nova Roma do Sul	-51,385278	-29,005833	CERAN	CERAN	19/03/2009 - 31/12/2012
2951087	Nova Roma do Sul	-51,367500	-29,013333	CERAN	CERAN	18/03/2009 - 31/12/2012
2952029	Pouso Novo	-52,166667	-29,166667	DEPRC	DEPRC	01/01/1949 - 31/12/1978
2951043	Progresso	-52,000000	-29,250000	DEPRC	DEPRC	01/12/1948 - 31/12/1997
2951042	Relvado	-52,000000	-29,116667	DEPRC	DEPRC	01/07/1948 - 30/11/1978
2952012	Santa Cruz do Sul	-52,433333	-29,716667	INMET	INMET	14/08/1914 - 31/07/2008
2952038	São José do Herval	-52,284722	-29,040556	ANA	CPRM	26/08/2004 - 31/12/2016
2951005	São Sebastião do Caí	-51,366667	-29,583333	CEEE	CEEE	30/11/1962 - 31/12/1980
2951027	São Valério do Sul	-51,371111	-29,366389	ANA	CPRM	01/01/1970 - 31/12/2016
2851027	Serafina Corrêa	-51,933333	-28,700000	CEEE	CEEE	08/12/1960 - 30/11/2000
A894	Serafina Corrêa	-51,870751	-28,704806	INMET	INMET	06/04/2016 - 31/12/2016
86964	Soledade	-52,542387	-28,859211	INMET	INMET	27/02/2008 - 31/12/2016
2852002	Soledade	-52,583333	-28,933333	DEPRC	DEPRC	01/07/1948 - 31/12/1978

APÊNDICE A – Relação de estações pluviométricas utilizadas no presente estudo

(Conclusão)

Código	Cidade	Coordenadas		Responsável	Operador	Disponibilidade de dados/período
		Longitude	Latitude			
2852004	Soledade	-52,381667	-28,803889	CEEE	CEEE	03/12/1962 - 31/12/2016
2852053	Soledade	-52,511389	-28,813056	ANA	CPRM	18/08/2004 - 31/12/2016
2951030	Taquari	-51,816667	-29,800000	INMET	INMET	01/01/1932 - 31/01/1967
86987	Teutônia	-51,824283	-29,450334	INMET	INMET	04/10/2012 - 31/12/2016
2852023	Tio Hugo	-52,600000	-28,600000	CEEE	CEEE	10/04/1969 - 31/12/1982
2852030	Tio Hugo	-52,553611	-28,562778	CEEE	CEEE	01/09/1942 - 31/12/1982
2952037	Venâncio Aires	-52,249722	-29,470278	ANA	CPRM	15/08/2004 - 31/12/2016
9	Veranópolis	-51,569760	-29,045530	Netsenses	Netsenses	02/11/2013 - 31/12/2016
2851009	Veranópolis	-51,700000	-28,883333	CEEE	CEEE	01/02/1961 - 31/12/2001
2851033	Veranópolis	-51,550000	-28,933333	DEPRC	DEPRC	01/03/1951 - 31/12/1978
2951020	Veranópolis	-51,516667	-29,033333	CEEE	CEEE	01/01/1996 - 31/12/2001
2951084	Veranópolis	-51,533333	-29,021389	CERAN	CERAN	05/03/2009 - 31/12/2012
2951090	Veranópolis	-51,521944	-29,029167	CERAN	CERAN	20/03/2009 - 31/12/2012
2851001	Vista Alegre do Prata	-51,783333	-28,800000	DEPRC	DEPRC	01/03/1951 - 31/12/1981

APÊNDICE B – Relação de estações fluviométricas utilizadas no presente estudo

Código	Cidade	Coordenadas		Responsável	Operador	Disponibilidade de dados/período
		Longitude	Latitude			
86720000	Encantado	-51,855000	-29,234444	ANA	CPRM	15/10/1941 - 15/12/2016
12	Encantado	-51,854280	-29,233650	Netsenses	Netsenses	25/01/2014 - 07/12/2016
ENC - F	Encantado	-51,855070	-29,235190	CPRM	CPRM	17/07/2015 - 31/12/2016
86880000	Estrela	-51,970556	-29,495278	DNIT	DNIT	27/09/1941 - 09/10/2012
EST - F	Estrela	-51,962810	-29,473490	CPRM	CPRM	30/07/2015 - 31/12/2016
13	Estrela	-51,971750	-29,477340	Netsenses	Netsenses	30/05/2013 - 31/12/2016

APÊNDICE C – Relação parcial da organização de variáveis de precipitação diária

Data	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
01/12/2016	0,50	0,00	0,50	30,15	0,03	0,00	0,00	0,50	1,00	46,21	46,33	46,33	58,72	66,45	4,73
02/12/2016	0,38	0,50	0,00	0,50	15,06	0,09	0,00	0,50	0,87	31,53	46,62	46,71	52,84	66,03	3,77
03/12/2016	13,49	0,38	0,50	0,00	30,15	0,03	0,00	0,87	14,36	14,86	60,08	60,20	61,73	78,26	5,91
04/12/2016	13,75	13,49	0,38	0,50	0,50	15,06	0,00	13,86	27,61	28,11	58,76	73,94	73,95	91,01	7,64
05/12/2016	1,35	13,75	13,49	0,38	0,00	30,15	0,09	27,24	28,59	29,46	29,96	75,21	75,30	91,34	6,25
06/12/2016	3,74	1,35	13,75	13,49	0,50	0,50	0,03	15,10	18,84	32,70	33,20	78,91	79,03	91,42	5,70
07/12/2016	0,42	3,74	1,35	13,75	0,38	0,00	15,06	5,09	5,51	32,74	33,62	64,27	79,45	85,58	4,54
08/12/2016	2,55	0,42	3,74	1,35	13,49	0,50	30,15	4,16	6,71	21,81	35,67	36,67	82,00	83,54	4,10
09/12/2016	0,80	2,55	0,42	3,74	13,75	0,38	0,50	2,97	3,77	8,86	36,10	36,97	82,81	82,81	3,38
10/12/2016	0,95	0,80	2,55	0,42	1,35	13,49	0,00	3,35	4,31	8,47	23,57	37,93	83,67	83,76	2,84
11/12/2016	0,52	0,95	0,80	2,55	3,74	13,75	0,50	1,76	2,28	5,25	10,33	37,95	84,16	84,28	2,33
12/12/2016	0,00	0,52	0,95	0,80	0,42	1,35	0,38	1,47	1,47	4,83	8,98	37,57	69,10	84,28	1,82
13/12/2016	0,13	0,00	0,52	0,95	2,55	3,74	13,49	0,52	0,65	2,40	5,38	24,21	39,07	84,41	1,45
14/12/2016	0,26	0,13	0,00	0,52	0,80	0,42	13,75	0,13	0,39	1,86	5,22	10,72	38,83	84,67	1,19
15/12/2016	0,00	0,26	0,13	0,00	0,95	2,55	1,35	0,39	0,39	0,91	2,67	9,37	38,83	84,58	0,92
16/12/2016	0,00	0,00	0,26	0,13	0,52	0,80	3,74	0,26	0,26	0,39	1,86	5,64	38,34	84,55	0,72
17/12/2016	3,10	0,00	0,00	0,26	0,00	0,95	0,42	0,00	3,10	3,49	4,01	8,31	41,06	72,59	1,24
18/12/2016	2,01	3,10	0,00	0,00	0,13	0,52	2,55	3,10	5,11	5,37	5,50	7,78	29,59	44,45	1,41
19/12/2016	1,56	2,01	3,10	0,00	0,26	0,00	0,80	5,11	6,67	6,67	7,06	8,53	17,39	45,50	1,45
20/12/2016	0,36	1,56	2,01	3,10	0,00	0,13	0,95	3,57	3,93	7,03	7,29	7,94	16,40	45,87	1,21

Em que: P = precipitação média na bacia complementar; t = tempo; $-z$ = máxima defasagem temporal utilizada no estudo em dias; $Pacum$ = precipitação média acumulada na bacia complementar; xd = quantidade de dias; Pf = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

APÊNDICE D – Relação de variáveis organizadas e avaliadas na Abordagem 1

(Continua)

Data	Cota Lajeado (máx)	Cota Encantado (máx)	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
06/05/1941	29,22	19,48	1,41	21,54	117,66	40,00	4,29	13,86	5,32	139,20	140,60	180,61	227,27	321,76	487,89	564,68	30,77
20/05/1942	23,20	12,00	38,79	127,10	12,24	0,00	0,02	0,00	0,00	139,34	178,13	219,85	219,87	219,87	219,87	298,20	35,81
25/06/1944	21,96	10,47	56,05	57,39	72,73	10,34	7,31	5,32	0,69	130,12	186,17	238,45	247,28	259,44	260,18	262,60	37,38
27/01/1946	26,70	17,70	0,03	51,47	40,75	18,84	0,00	0,29	39,37	92,22	92,25	111,12	111,12	140,10	237,13	280,68	18,43
02/08/1948	19,90	10,60	15,12	23,65	4,64	0,03	0,00	15,15	34,05	28,29	43,42	43,45	47,61	79,78	129,20	170,11	10,09
17/10/1950	25,63	16,60	0,88	83,22	31,11	0,23	0,00	0,12	3,70	114,32	115,20	115,43	115,43	136,15	151,40	151,40	19,43
16/09/1953	22,41	13,60	5,09	47,32	11,08	0,00	5,75	54,64	0,08	58,40	63,48	63,50	70,07	146,11	148,51	174,89	14,00
22/09/1954	26,65	18,50	42,39	32,03	7,00	0,51	4,62	0,41	15,91	39,03	81,42	123,62	128,43	130,58	217,73	268,47	20,62
19/05/1955	19,61	10,45	10,10	35,20	16,09	2,57	18,75	2,55	0,00	51,29	61,40	68,32	91,99	105,85	122,20	155,81	13,20
06/04/1956	28,16	19,33	36,81	114,65	26,48	4,95	15,71	4,32	2,39	141,13	177,93	194,91	210,92	230,08	257,22	265,91	34,70
09/09/1957	22,15	13,50	42,57	23,41	1,51	11,10	1,86	0,19	0,98	24,93	67,50	95,28	97,46	99,18	102,87	119,34	16,47
13/06/1958	21,10	12,72	29,87	16,10	19,58	12,45	13,93	2,42	0,00	35,67	65,55	80,00	123,42	126,34	126,42	136,83	15,93
23/06/1959	25,93	16,59	63,65	65,47	14,78	0,00	0,01	0,00	0,00	80,25	143,90	143,90	143,91	143,91	147,08	165,32	27,32
01/09/1960	22,00	12,98	5,17	57,74	32,09	1,96	0,42	11,78	0,00	89,83	95,00	96,97	101,73	114,30	143,99	187,61	16,60
30/09/1961	22,10	13,65	26,30	25,40	38,75	31,01	4,24	7,41	2,47	64,16	90,46	131,69	137,18	174,22	209,04	243,06	21,41
18/10/1963	22,00	10,69	1,63	33,26	4,45	17,69	20,10	32,08	1,37	37,71	39,34	74,83	109,64	247,42	260,65	273,18	16,45
22/08/1965	25,70	18,46	20,70	53,14	18,63	2,33	22,10	3,41	0,00	71,77	92,47	96,71	120,23	124,26	124,26	150,38	18,31
06/08/1966	21,30	11,91	53,28	46,64	15,94	1,39	0,00	44,55	0,07	62,58	115,86	117,34	118,56	177,72	224,87	242,93	24,71
21/09/1967	25,63	17,46	35,18	52,88	77,32	13,21	0,00	20,78	0,10	130,20	165,38	181,05	181,05	243,26	266,13	372,49	31,45
16/03/1971	22,00	10,40	93,66	50,54	39,46	2,84	0,26	1,09	0,35	90,00	183,66	186,64	188,68	200,81	214,23	222,21	35,56
29/08/1972	22,70	14,95	2,39	21,01	32,43	22,10	0,00	32,82	0,05	53,45	55,83	104,07	104,16	191,01	191,41	286,89	15,96
21/09/1972	20,50	11,64	32,39	59,54	31,37	16,05	0,00	0,00	28,89	90,91	123,30	139,35	139,37	139,37	222,86	238,75	24,49

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo, em dias; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

APÊNDICE D – Relação de variáveis organizadas e avaliadas na Abordagem 1

(Continuação)

Data	Cota Lajeado (máx)	Cota Encantado (máx)	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
19/09/1973	21,50	12,34	23,74	42,81	23,59	37,01	9,18	2,98	11,88	66,39	90,14	130,23	139,81	150,28	163,34	163,34	21,02
11/08/1975	19,10	10,35	42,21	42,49	5,67	4,93	8,74	0,01	0,00	48,16	90,37	98,91	136,39	136,40	141,09	145,94	20,20
09/08/1976	21,70	13,94	35,76	31,42	0,48	3,55	11,84	0,14	0,74	31,90	67,66	84,01	96,43	112,66	149,73	154,92	16,26
03/08/1977	20,40	14,03	24,46	21,06	33,75	3,77	48,83	0,78	0,52	54,81	79,28	87,98	146,40	153,96	216,47	266,87	19,08
19/08/1977	23,20	14,91	18,00	28,49	22,78	0,05	19,30	0,00	3,67	51,27	69,27	80,58	105,66	106,27	112,52	195,57	14,79
30/07/1980	20,38	13,80	39,66	87,09	0,00	9,99	0,00	0,00	0,00	87,09	126,75	136,74	136,74	147,59	147,59	154,07	25,02
23/08/1980	21,00	13,75	4,35	28,23	11,18	52,57	13,51	0,00	1,27	39,41	43,76	115,87	136,35	139,93	141,20	151,60	15,79
29/06/1982	24,26	15,64	124,17	33,71	1,75	0,43	0,01	5,39	0,00	35,45	159,63	160,07	160,50	194,39	264,32	291,31	35,15
24/10/1982	22,00	13,56	10,22	91,31	38,99	0,08	3,20	0,00	0,85	130,30	140,51	140,59	170,68	170,68	185,59	206,43	24,93
12/11/1982	20,50	12,40	3,35	76,00	0,84	3,36	0,35	13,45	13,60	76,84	80,19	83,56	110,52	180,30	203,06	228,87	18,15
03/05/1983	19,75	11,65	40,68	25,24	8,63	42,57	0,00	1,14	0,00	33,88	74,55	117,13	117,13	139,06	171,85	174,11	19,83
07/07/1983	24,05	16,70	73,06	12,59	0,99	8,61	10,14	0,00	3,54	13,58	86,64	98,82	110,72	110,72	183,62	220,90	21,21
02/08/1983	19,56	11,26	12,02	11,61	27,17	2,59	19,48	32,43	2,27	38,78	50,79	61,21	81,15	122,42	126,45	171,09	12,30
18/08/1983	22,14	14,85	20,65	15,64	53,00	42,10	6,48	0,00	0,00	68,64	89,29	131,42	137,90	150,55	150,77	214,21	19,66
09/07/1984	19,75	11,27	31,24	33,49	5,66	31,09	16,47	0,00	0,00	39,15	70,39	104,80	121,27	121,27	139,11	194,54	18,48
10/05/1985	18,25	10,07	18,57	55,76	19,58	3,43	0,00	0,00	8,41	75,34	93,91	97,34	97,34	97,34	121,46	123,29	17,00
13/08/1985	17,02	8,85	1,58	17,94	22,81	13,31	19,19	0,00	0,13	40,75	42,33	86,36	105,54	126,85	158,90	182,97	12,55
31/05/1986	16,60	8,30	9,55	61,11	8,58	0,00	0,14	0,00	1,01	69,68	79,23	79,23	110,17	110,23	157,84	161,61	15,75
11/10/1986	18,90	10,25	33,41	49,34	3,11	13,00	0,00	0,00	0,00	52,45	85,86	98,86	98,87	98,87	100,60	143,58	17,83
15/05/1987	18,95	11,55	18,49	31,77	8,68	1,00	0,00	29,20	0,00	40,45	58,95	59,94	72,32	103,33	129,48	129,55	12,85
30/07/1987	20,65	11,53	39,20	70,73	0,78	0,00	0,00	0,00	8,21	71,50	110,70	110,70	110,70	112,68	126,82	181,12	21,41
15/08/1987	18,95	11,36	7,49	34,72	13,82	37,87	0,00	5,82	6,58	48,54	56,03	103,98	103,98	124,55	131,80	261,91	15,34

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo, em dias; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

APÊNDICE D – Relação de variáveis organizadas e avaliadas na Abordagem 1

(Continuação)

Data	Cota Lajeado (máx)	Cota Encantado (máx)	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
14/09/1988	23,55	16,20	15,86	46,75	76,44	49,26	0,18	4,67	0,00	123,19	139,05	202,52	207,05	212,79	215,64	216,53	28,52
25/09/1988	21,70	11,32	48,78	48,15	3,81	39,15	1,59	0,42	0,00	51,97	100,75	205,31	217,33	217,75	406,06	430,54	31,41
06/07/1989	19,95	12,44	42,26	11,94	12,65	43,55	0,14	7,10	4,11	24,59	66,85	131,61	134,51	148,09	187,70	187,78	20,45
13/09/1989	24,50	18,35	46,94	32,07	1,33	11,51	5,41	0,00	0,00	33,40	80,34	96,90	113,16	113,16	161,04	210,69	19,25
25/09/1989	25,20	18,39	49,55	68,15	4,03	0,00	0,00	0,00	11,00	72,19	121,74	121,74	121,74	131,17	236,75	269,57	24,74
01/06/1990	25,94	19,47	62,57	44,91	20,53	15,53	0,00	0,00	0,00	65,45	128,02	148,77	148,77	148,77	154,98	157,01	26,36
23/09/1990	17,95	9,63	37,61	47,71	13,25	7,37	0,00	0,68	57,35	60,96	98,57	111,42	111,42	114,36	187,46	216,79	20,88
13/10/1990	21,40	13,55	6,40	50,83	16,57	5,13	31,60	1,05	0,06	67,39	73,79	122,69	173,47	174,51	193,47	195,71	19,79
27/12/1991	18,20	10,55	10,93	61,59	13,61	5,76	4,09	9,20	0,81	75,20	86,12	96,69	100,92	115,92	190,34	220,32	17,53
29/05/1992	24,65	18,40	55,31	56,15	4,06	4,53	9,86	0,00	3,51	60,20	115,51	121,87	133,21	133,21	150,44	195,83	24,13
06/07/1992	18,15	9,88	22,88	30,04	1,65	2,59	32,38	5,45	0,04	31,68	54,56	73,69	117,29	129,89	162,38	162,45	15,33
25/09/1992	16,19	7,71	27,15	20,78	9,31	2,20	0,00	17,58	0,12	30,09	57,24	59,44	59,94	77,58	101,73	109,69	12,00
05/06/1993	17,90	8,20	30,43	44,18	18,17	1,28	31,27	0,24	6,89	62,35	92,79	94,29	138,98	163,57	170,46	186,35	20,31
06/07/1993	20,45	13,40	31,32	17,74	17,82	3,61	0,84	0,00	6,90	35,56	66,88	70,49	71,41	71,41	101,24	129,81	13,31
03/07/1994	17,30	10,05	28,01	26,73	0,06	0,05	0,03	0,58	4,65	26,79	54,80	54,87	55,03	61,44	121,75	133,24	11,63
04/08/1997	24,90	18,00	38,52	69,50	25,73	30,18	0,00	0,00	0,00	95,23	133,74	165,16	165,16	165,16	181,58	232,54	27,38
16/10/1997	19,00	10,50	13,63	48,22	10,90	42,50	10,70	19,86	16,31	59,12	72,75	132,57	164,27	186,18	300,73	345,58	22,91
01/11/1997	18,10	10,47	22,96	22,59	13,08	42,54	0,00	4,97	16,22	35,67	58,63	116,21	116,21	125,79	142,54	257,79	17,41
16/08/1998	20,85	13,80	78,58	0,77	0,47	0,07	1,41	0,00	0,03	1,24	79,82	83,29	84,80	84,97	121,30	140,50	18,30
14/10/2000	22,75	15,70	2,63	70,30	55,72	2,37	0,00	0,00	18,85	126,01	128,64	154,31	154,50	175,19	212,84	213,67	23,37
21/07/2001	25,60	18,70	9,95	93,02	24,21	3,08	8,16	0,00	12,22	117,24	127,18	130,39	138,56	147,17	171,84	233,75	23,10
02/10/2001	26,25	19,58	64,78	67,36	10,42	17,43	30,21	0,06	0,06	77,79	142,56	160,63	195,34	196,72	196,82	263,69	31,50

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo, em dias; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

APÊNDICE D – Relação de variáveis organizadas e avaliadas na Abordagem 1

(Continuação)

Data	Cota Lajeado (máx)	Cota Encantado (máx)	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
13/06/2002	21,50	14,27	42,50	10,51	24,41	25,01	24,16	0,00	1,59	34,92	77,42	131,57	158,65	178,74	208,65	208,65	21,90
03/07/2002	18,75	10,40	70,18	10,83	14,19	0,00	0,00	0,00	0,56	25,02	95,20	95,83	95,83	97,67	116,24	125,40	19,60
21/02/2003	21,00	15,00	7,42	63,98	0,00	0,00	0,00	6,72	1,71	63,98	71,40	90,78	90,95	98,04	135,59	159,31	15,02
09/07/2003	18,95	10,20	65,72	9,65	0,03	27,73	0,03	0,00	0,00	9,68	75,39	104,80	104,83	104,85	104,85	111,16	19,22
27/10/2003	20,04	11,45	0,05	94,51	34,25	0,00	0,05	2,80	0,00	128,77	128,82	128,82	157,58	163,26	163,26	226,69	22,61
16/12/2003	19,68	10,57	51,17	45,06	3,22	0,43	6,09	19,09	6,11	48,28	99,45	160,44	166,53	203,23	227,75	232,76	26,46
19/05/2005	20,24	12,95	46,72	44,88	2,29	0,71	2,95	16,38	8,62	47,17	93,90	96,51	100,86	138,21	169,49	169,56	20,39
17/10/2005	22,25	15,29	24,23	37,75	12,84	33,45	0,00	0,08	8,58	50,59	74,82	108,27	108,27	146,26	253,21	258,10	19,10
27/07/2006	19,16	11,04	42,73	69,02	29,86	0,51	0,00	0,02	1,29	98,88	141,61	142,52	142,52	142,58	153,01	166,77	25,51
11/07/2007	23,82	17,87	9,93	40,68	30,08	47,91	2,59	0,00	0,00	70,76	80,69	147,01	149,60	149,60	157,89	175,91	20,00
24/09/2007	25,55	18,65	14,30	101,97	48,29	37,79	20,94	0,13	0,00	150,27	164,57	218,61	250,06	250,25	250,25	251,12	34,26
27/10/2008	25,95	18,90	81,78	45,27	12,64	14,61	0,00	0,21	5,62	57,91	139,69	161,05	161,05	164,50	251,69	262,80	30,70
10/08/2009	20,85	11,57	46,26	57,94	43,96	19,15	0,08	2,03	0,89	101,90	148,16	175,31	175,45	201,06	202,41	218,80	29,49
13/09/2009	23,8	16,9	38,64	27,45	15,78	3,18	14,36	0,04	41,09	43,22	81,87	124,81	141,98	182,25	233,84	233,89	21,86
28/09/2009	21,05	13,22	33,99	49,32	13,03	0,00	4,15	0,00	28,48	62,34	96,33	100,38	106,20	106,48	143,35	231,26	19,43
05/01/2010	23,25	12,4	82,96	117,56	9,94	0,00	1,85	2,07	8,29	127,51	210,46	210,46	213,66	224,43	301,13	315,55	41,11
23/09/2010	20,85	13,3	19,93	76,33	23,33	0,09	0,00	1,96	17,68	99,65	119,59	119,68	119,68	124,83	164,03	207,19	21,56
27/03/2011	18,8	11,35	36,03	58,93	30,48	4,89	0,00	0,00	0,04	89,41	125,44	130,41	130,41	144,88	148,98	162,92	23,10
21/07/2011	26,15	19,5	84,08	33,22	6,61	19,16	4,27	19,67	1,52	39,83	123,91	153,48	168,28	200,17	202,16	214,39	29,94
10/08/2011	23,96	16,28	55,44	66,53	10,79	0,19	0,79	9,19	25,95	77,32	132,75	133,14	139,67	155,54	229,74	318,43	27,32
20/09/2012	20,55	14,3	0,23	79,07	21,93	21,27	1,01	1,00	52,12	100,99	101,22	130,45	131,51	154,34	220,82	220,86	21,21
25/08/2013	23,13	15,4	54,38	58,08	22,45	7,90	0,00	0,07	0,62	80,53	134,91	142,81	142,83	143,06	178,45	224,89	26,40

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo, em dias; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.

APÊNDICE D – Relação de variáveis organizadas e avaliadas na Abordagem 1

(Conclusão)

Data	Cota Lajeado (máx)	Cota Encantado (máx)	P (t-0)	P (t-1)	P (t-2)	P (t-3)	P (t-5)	P (t-7)	P (t-10)	Pacum 2d	Pacum 3d	Pacum 5d	Pacum 7d	Pacum 10d	Pacum 15d	Pacum 20d	Pf
06/06/2014	19,19	11,47	21,92	30,83	6,63	0,08	17,06	0,52	0,69	37,46	59,38	60,29	119,75	120,56	129,52	189,83	14,71
29/06/2014	18,21	9,08	27,47	27,42	14,05	17,38	9,63	0,59	0,07	41,46	68,93	112,83	141,66	142,45	150,06	208,55	18,59
30/09/2014	16,32	9,18	22,78	29,69	6,40	0,05	10,28	2,14	2,29	36,09	58,87	93,06	114,64	116,85	124,00	210,77	15,42
20/10/2014	19,79	11,32	7,82	43,41	36,38	43,07	1,74	24,23	0,24	79,79	87,61	137,58	149,80	188,29	192,26	202,54	21,23
15/07/2015	20,65	13,29	14,21	35,00	55,22	1,83	0,70	18,48	0,00	90,22	104,43	106,30	132,31	169,14	176,01	206,89	19,59
21/07/2015	17,17	9,02	22,10	39,41	5,12	0,97	2,94	35,00	0,04	44,53	66,63	84,29	101,44	193,49	255,42	262,93	18,37
21/09/2015	21,4	12,76	59,24	22,26	15,26	21,36	0,00	0,00	5,74	37,52	96,76	122,23	122,25	131,98	140,61	148,39	21,87
10/10/2015	23,81	15,95	46,14	65,31	19,49	4,39	0,01	5,53	0,02	84,80	130,94	135,34	145,45	150,98	166,98	269,25	25,63
23/10/2015	17,02	9,56	0,56	25,31	17,86	3,06	0,09	11,02	0,40	43,17	43,72	46,78	54,15	91,34	166,51	255,71	9,82
15/07/2016	21,9	15,01	9,35	27,70	4,56	10,29	9,24	7,50	0,74	32,27	41,62	81,35	96,75	122,10	123,50	123,81	12,53
20/10/2016	24,56	17,37	23,61	51,60	76,86	48,26	2,91	13,65	0,09	128,46	152,07	213,07	215,99	231,50	267,98	274,73	31,47

Em que: *máx* = cota máxima registrada; *P* = precipitação média na bacia complementar; *t* = tempo; - *z* = máxima defasagem temporal utilizada no estudo, em dias; *Pacum* = precipitação média acumulada na bacia complementar; *xd* = quantidade de dias; *Pf* = precipitação na bacia complementar, com filtros de decaimento exponencial.